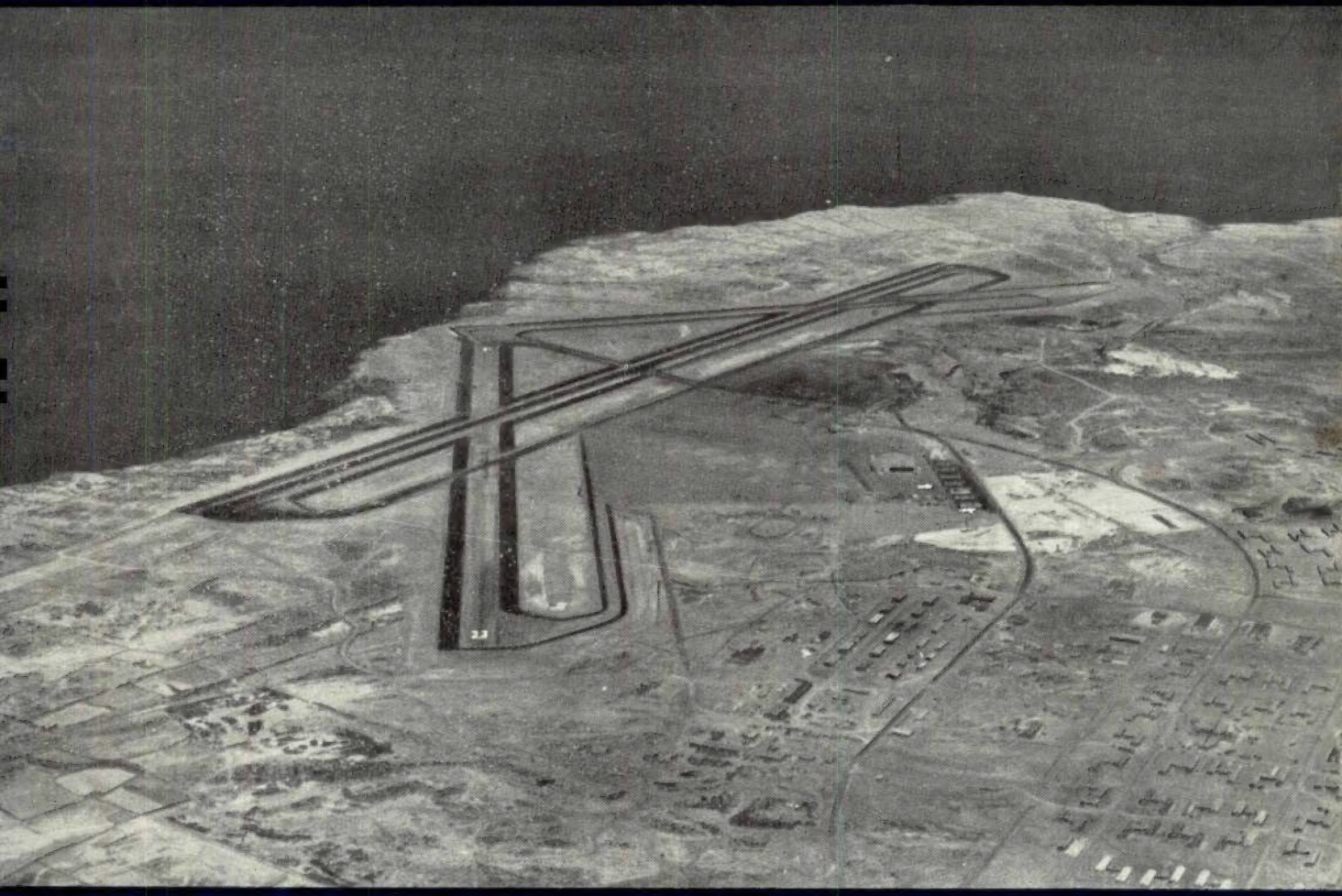
TÉCNICA



REVISTA DE ENGENHARIA
DOS ALUNOS DO I.S.T.

N.º 196-Novembro-1949

CIMENTO

SECIL

Fabricado pelos mais modernos processos e preferido para todos os trabalhos de responsabilidade.
Sacos de papel ou de juta com 50 Kg.
Barricas de 180 Kg.

S E C I L

COMPANHIA GERAL DE CAL E CIMENTO
RUA DO COMÉRCIO, 56, 3.º
LISBOA

Oficina e Laboratórios

do

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

As oficinas pedagógicas do Instituto Superior Técnico, de CARPINTARIA DE MOLDES, de INSTRUMENTOS DE PRECISÃO e de ELECTROTECNICA, fornecem todo o género de material escolar e de demonstração para o ensino técnico. Nos laboratórios de QUÍMICA-ANALÍTICA, FÍSICA INDUSTRIAL E DE MINERALOGIA executam-se análises para o público.

Para quaisquer informações, dirigir-se ao secretário da comissão executiva

Cimento «Liz» hidrofugado «N»

PRÓPRIO PARA

IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS

REBOCOS, FUNDAÇÕES, PAREDES, ETC.

Substitue com vantagem de ordem técnica e económica todos os impermeabilizadores conhecidos.

Em sacos de papel de 50 quilos

Peçam instruções para o seu emprêgo

Sede: Rua do Cais de Santarém, 64, 1.º — LISBOA
Filial: Rua de Santo António, 190-A, 1.º — PORTO

Agentes em todo o País

NÚMERO
196
Novembro — 1949

TÉCNICA

REVISTA DE ENGENHARIA
DOS
ALUNOS DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Redacção e Administração: AV. ROVISCO PAIS, IST / LISBOA-N./ TEL. 70144 (linha 50)

DIRECTOR
JOSÉ MARIA AVILLEZ
ADMINISTRADOR
LUÍZ DA CUNHA FERRAZ
BIBLIOTECÁRIA
MARIA HELENA PORTUGAL DA SILVEIRA
CORPO REDACTORIAL
ARMANDO COUTINHO DE LENCASTRE
JÚLIO FERREIRA LOPES
MARGELINO ABREU COSTA

NÚMERO AVULSO 9$00
ASSINATURAS:

	3 N.os	6 N.os	12 N.os
Continente e Ilhas	25$00	45$00	85$00
Colónias Portuguesas e Estrangeiro	—	50$00	90$00

EDITOR E PROPRIETARIO
ASS. DOS ESTUD. DO I. S. T

COMPOSTO E IMPRESSO
NA
Tip. JORGE FERNANDES, L.da
RUA CRUZ DOS POIAIS, 103
LISBOA

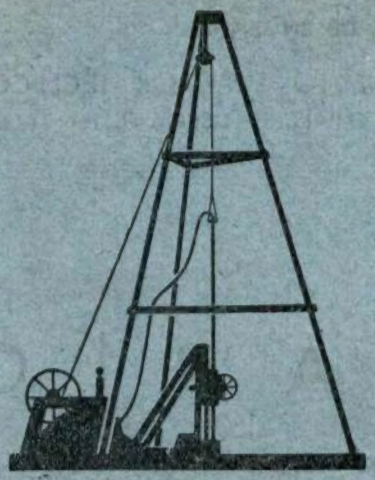
SUMÁRIO

CAPA — Aeroporto de Santa Maria (Açores). Vista aérea.

		Págs
Perante alguns prováveis caminhos da nossa industrialização	Eng.º Virgílio Rui Teixeira Lobo	659
A Mecânica do Solo e as suas aplicações	Eng.º Manuel Pimentel Pereira dos Santos	669
Processes unitários da química orgânica — Polimerização	Eng.º Manuel Chagas Roquette	695
Diferenciação de pavimentos de estradas e de pistas de aviação	Eng.º J. M. Seguro	705
Vida escolar e associativa. Aos antigos alunos	Armando Coutinho de Lencastre	720
Do Engenheiro e sua definição	Eng.º P. Celestino da Costa	722
Biblioteca		725

OS ARTIGOS PUBLICADOS NESTA REVISTA SÃO DE EXCLUSIVA RESPONSABILIDADE DOS AUTORES

SONDAGENS RODIO, Limitada



RODIO

Sondagens geológicas, estudo da resistência e permeabilidade de terrenos; laboratório geotécnico

Pesquisas de água.

Consolidação e impermeabilização de terrenos e de obras por meio de injecções de cimento, produtos químicos, argila activada, emulsão betuminosa Shellperm, etc.

Estacas de betão armado, sistema **Ródio** moldadas no solo sem trepidações.

Rebocos comprimidos por «**cement gun**»

Fundações em terrenos difíceis quer por congelação artificial, quer por abaixamento do lençol de água.

As melhores referências no país e no estrangeiro

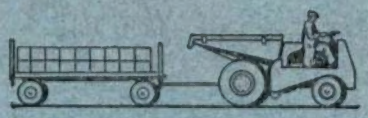
Sócio gerente residente em Portugal:
Walter Weyermann, Eng. civil

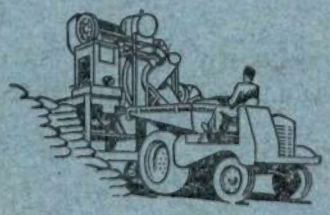
R. S. Mamede ao Caldas, 22, 3.º — LISBOA

Tel. 2 8685

MUIR-HILL DUMPER

TRANSPORTADORES BASCULANTES COM COMANDO ROTATIVO





O método mais económico de transportar materiais a granel, como podem comprovar as unidades já ao serviço em Portugal

///

OS REPRESENTANTES EXCLUSIVOS

HENRY M. F. HATHERLY, L.DA

RUA DO COMÉRCIO, 8

Telefones 2 2001 e 2 6633 — LISBOA

vos fornecerão todos os detalhes e as suas propostas para entregas rápidas

TÉCNICA

JOSÉ MARIA AVILLEZ
DIRECTOR

ANO XXVI - N.º 196 NOVEMBRO 1949

PERANTE ALGUNS PROVÁVEIS CAMINHOS DA NOSSA INDUSTRIALIZAÇÃO

A INVESTIGAÇÃO E O ENSINO

PELO ENG.º QUÍMICO-INDUSTRIAL (I. S. T.) VIRGÍLIO RUI TEIXEIRA LOPO

C. D. 62.003 (469)

De tal modo nos parece traçado o caminho da nossa industrialização — as suas linhas gerais, a sua posição económica e social, os seus reflexos na vida da Nação — que seria repetição escusada ou discussão estéril a revisão do problema, numa fracção que fosse, do conjunto dos seus variados aspectos.

Sem desprestígio para outros, bastará referir o trabalho do Prof. Ferreira Dias «Linha de Rumo», os «Ensaios de Economia Aplicada», do Eng.º Araújo Correia e «Os Novos Caminhos da Indústria Portuguesa», do Eng.º Ferreira do Amaral.

Na sua essência, está marcado o caminho dos próximos anos, que se enquadrará, para ser seguro, nas tendências gerais da evolução da técnica nos países mais adiantados, adaptadas ao nosso meio.

Cremos bem, como já tivemos ocasião de referir a propósito do problema do ferro, que no campo da técnica e da economia, essas tendências se resumem, na generalidade, ao aproveitamento integral de tudo o que é susceptível de constituir riqueza, isto é, a uma «revalorização de todos os valores».

No campo social, a síntese crêmo-la também já feita — e desde há muito — quando se notou que «o problema social é o problema da distribuição da riqueza, que não tem solução vantajosa sem o aumento da produção».

Tem sido, até agora, indiscutìvelmente lento o nosso reapetrechamento industrial, o que não é o mesmo que dizer-se que tem sido pequeno o esforço neste campo, sobretudo se tivermos presentes as circunstâncias do passado próximo.

Estão à vista os primeiros frutos, pelo menos no sector em que os sentimos de perto. Algumas lições nos tem dado já este primeiro reapetrechamento, as quais se poderiam

deduzir de um estudo cuidadoso do que se passa nos países mais industrializados e que virá, lògicamente, a passar-se entre nós, vencidas as distâncias em atraso — tarefa simplificada no trabalho de criação, mas agravada pelas condições do meio e pelas dificuldades de ajustamento.

Ocupar-nos-emos, após uma rápida referência a alguns dos prováveis caminhos da nossa industrialização, de um problema cuja resolução, em bases seguras, as circunstâncias desde já impõem que se inicie: o problema da investigação.

Procuraremos mostrar as suas ligações com o ensino, de que não é fácil, nem parece ser de interesse dissociá-lo.

Restringir-nos-emos, na referência a alguns prováveis caminhos da nossa industrialização, quase que em exclusivo à indústria química, aliás sem pretensão, de longe sequer, de sermos completos. No conjunto dos problemas tratados, não poderemos sair de generalidades e sem autoridade (que lhe não podemos conferir) o seu estudo é apenas o resultado de se procurar adaptar ao nosso meio, o que referências alheias nos parecem prementemente indicar.

O interesse do que vai seguir-se, não poderá consistir na novidade dos assuntos tratados e, se algum tiver, será apenas o de reavivar um problema a que estarão indissolùvelmente ligados todos os passos futuros do nosso progresso industrial.

I — Alguns prováveis caminhos da nossa industrialização

a) *Tendências gerais*

Quem serenamente procure fazer um estudo comparativo da evolução da técnica [1] nos últimos anos, quer por contactos directos com instalações de países mais progressivos, quer pela dedução estatística dos seus índices de produção e concomitantemente de nível de vida, quer pela leitura mais ou menos assídua de publicações da especialidade — notará, de-certo, duas características fundamentais dessa mesma evolução:

— que, de há duas décadas para cá, se verificou uma mudança profunda na tecnologia e nos princípios económicos em que assenta a criação de novas indústrias;

— que no nosso país a evolução tem sido demasiadamente lenta (não podemos esquecer que partimos de um mínimo muito próximo de zero).

Nestes princípios assentaram, de uma maneira geral e implícita, os autores dos trabalhos referidos e foi também a partir desta contestação, evidente para quem conheça mais ou menos de perto o nosso meio industrial, que se traçaram os novos rumos de fomento — a energia, o reapetrechamento industrial e agrícola, a regularização do comércio externo.

Entrámos francamente na época em que se tornou um lugar comum (íamos a dizer, um apêgo para a salvação económica do após-guerra) a insistência na necessidade do aumento de produção, na criação de riqueza. Talvez por ser apanágio dos nossos tempos a repetição ou a negação de evidências, que a insistência tenha tomado um cunho muito

---

[1] Temos em mente o respeitante à indústria química em especial, sem pretendermos generalizar a todos os outros ramos da técnica.

acentuado; mas não se lhe poderá negar o mérito de demonstrar que é bem supérfluo, no momento que passa, o desperdício de energias na questiúncula ou no tratamento rasteiro dos assuntos, tão agradáveis, por vezes, a certos sectores do nosso meio.

A ilusão efémera do movimento de capitais e da melhoria passageira da nossa balança comercial como reflexo da guerra — «de 1943 para cá melhorámos mais por desfavor dos estranhos que por avanço absoluto das condições de vida própria» — (1) deixou, pelo menos, claro o caminho a seguir, aliás sem reservas traçado nos diplomas e nas directrizes do Ministério da Economia.

Outrotanto não parece ainda estar bem assente e sobretudo bem *sentido,* quanto ao que poderemos chamar o «espírito executivo», a mentalidade orientadora da realização, no percurso traçado.

Queremos dizer que, se em algumas grandes empresas nossas existe nm revigoramento de processos, uma mentalidade nova de administração e de técnica, outrotanto não sucede com determinado número delas, onde técnica é rotina que se esconde dos progressos no seu campo, se alberga na protecção pautal e onde se vende com inconsciência feliz dos problemas básicos da produção.

Não será demais repetir que só poderá ser estimulada a técnica que se alicerçar em bases científicas e que a orientação da indústria deverá tender, acima de tudo, para a melhoria de qualidade e embaratecimento do produto.

. . . . . .

São muitos os exemplos, de directo interesse para nós, que documentam com clareza a evolução anteriormente referida e se resumem na ideia da «revalorização de todos os valores» que, como dissemos, parece ter tomado forma de há duas décadas para cá.

Mesmo para aqueles qne tudo esperavam da guerra (salvo as decepções do presente) e que no após-guerra cuidavam ver o começo de uma nova evolução da técnica industrial — supomos que aquela fórmula está verificada.

Já em 1945, a propósito da evolução dos problemas metalúrgicos, o engenheiro Menendes de Vigo notava de uma maneira que se nos afigura perfeita: (2) «Os fenómenos de toda a ordem económica que se produzem nos tempos de guerra, não são nem exclusivos nem originados pròpriamente nos momentos de luta e, embora neles tenham a sua expressão mais acentuada, permaneceram num estado latente anterior à manifestação de violência e seguirão, após esta, com as variantes e modificações que da contenda se deduzam. Se, como na maior parte das lutas da humanidade, há um móbil económico que as dirige e na guerra anterior foi a conquista dos mercados — a actual contenda teve o seu gérmen económico ante a limitação dos recursos naturais para abastecer as indústrias e, se esta tem sido a preocupação das fases mais violentas da luta, será também a que dominará no futuro após-guerra».

Recordámos estas palavras quando nos referimos ao problema do ferro, exemplo, ao que supomos, dos mais interessantes e comprovativos da evolução referida. Aliás, os problemas metalúrgicos e o problema dos plásticos parecem ser os fulcros de toda a substituição, em curso, de produtos de uso anteriormente considerado normal. A sua evolução enquadra-se bem na ideia, que parece será norma cada vez mais assente, de que os problemas da fabricação de produtos de substituição são mais de qualidade que de quantidade.

Recordaremos agora alguns outros exemplos que se nos afiguram curiosos, comprovativos da evolução referida e que, mais tarde ou mais cedo, nos deverão interessar. Pro-

---

(1) Eng.º Ferreira do Amaral, Os Novos Caminhos da Indústria Portuguesa, pág. 9.

(2) Dyna, Julho 1945.

duto de visitas, leituras e observação, embora restrita, do nosso meio, as notas seguintes não têm originalidade alguma e restringem-se, como acentuámos, quase que em exclusivo à indústria química. Em alguns pontos, a generalização aos restantes campos da técnica não é difícil.

De uma maneira geral, poderemos desde já dizer que a criação de produtos de substituição e a utilização de processos de síntese são a primeira pormenorização da ideia em que insistimos.

. . . . . .

A observação de alguns progressos mais espectaculares (que citamos ao acaso): a ampliação das potências dos motores eléctricos até 65.000 H. P. [1]; a elevação da temperatura de funcionamento das turbinas; a medição da espessura das chapas de aço nas laminagens, pelos raios X; os filmes de alta velocidade tirados com raios X; a tendência para as grandes velocidades das turbo-máquinas; a elevação na produção de chapas de aço a 1.600 metros por minuto; o radar; a energia atómica e tantos outros avanços recentes da técnica — se por um lado trazem à evidência o objectivo premente da intensificação da produção e redução dos custos, a necessidade de pesquisa, podem, à primeira vista, ocultar o movimento da evolução da tecnologia química, em especial a dos fabricos já existentes.

Mas quem notar a intensificação do estudo dos problemas industriais que por toda a parte se faz ou anuncia constantemente, verificará que, por detrás de comissões reunidas com maior ou menor eficiência por toda a parte, a prègar a salvação económica pela produção — se assiste, efectivamente, a um movimento menos espectacular, mas bem sólido, nos processos industriais.

É assim que a propósito do Plan Monet se insistia recentemente em França [2] em que «seule l'amélioration substantielle de notre outillage permettra au travailleur français, des champs ou de l'usine, un rendement équivalent à celui du travailleur américain».

E recordava a propósito que, enquanto um cultivador dos Estados Unidos alimenta, pelo seu trabalho, 20 habitantes, em França alimenta 6; do mesmo modo, ao passo que um mineiro americano extrai 5 ton. de carvão por dia, um mineiro francês extrai apenas 1; que enquanto a construção de uma casa para 4 pessoas custa duas vezes e meia o salário anual de um operário, em França custa dez, etc.

O mesmo autor referia, com desgosto que, por outro lado, o francês tem um desafecto nítido pelo trabalho produtivo, preferindo aos campos e às fábricas, o negócio, de tal modo que o número de agricultores decresceu de 9 a 6 milhões entre 1906 e 1946, ao passo que o de comerciantes passou de 2, a mais de 3,3 milhões.

Pensámos na analogia com o que se passa entre nós e notámos o bom senso do autor ao referir que «croire qu'un libéralisme total permettra sans études et par les seules initiatives individuelles de sauver la situation, est une erreur dangereuse; seul un plan cohérent, fixant l'utilisation des ressources-clés, permettra d'utiliser rationellement et au maximum les moyens et les crédits dont nous disposons».

A consideração destas questões de reorganização, não permite dissociar os problemas de indústria dos problemas da energia e da produção agrícola.

Na verdade, dentre muitas lições que o após-guerra nos dá, uma das não menos importantes é a da necessidade de um mínimo, pelo menos, de autarquia agrícola; como é bem conhecido, é este mínimo que condiciona em parte os projectos de utilização dos

---

(1) O Engenheiro Westhinghouse, Dez. 1948.

(2) Daniel Florentin, Chimie et Industrie, vol. 60, n.º 3, Sept. 48, pg. 283.

recursos naturais para a produção de energia e estes, com os primeiros, a utilização das matérias primas.

Passou a ser lugar comum dizer-se que a energia tende a condicionar quase integralmente a possibilidade da criação de novas indústrias; no caso da Suíça, por exemplo, supre a pobreza das matérias primas e a dificuldade da sua aquisição como país interior.

Mas é certo também que nem sempre se torna necessária a existência de mananciais constantes para justificar a criação de novas indústrias.

Com efeito, quando no final do curso pudemos visitar algumas instalações suíças, em Sierre (Chippis) na «Société pour l'Industrie de l'Aluminium», verificámos que partiam de bauxites importadas de França; indicaram-nos a composição da carga, a condução da fusão, a aspiração de gases e poeiras, mas nada nos disseram, de início, sobre o tratamento das bauxites, o que, afinal não constituía segredo de fabricação porque, pouco depois, soubemos que as bauxites são importadas de França já tratadas.

Na visita, em Prattern, a uma grande destilação de alcatrões, verificámos que todos eram importados do Ruhr; em Bex, o sal é extraído de minas de sal gema,sendo a concentração das salmoiras feita por aquecimento eléctrico; em Broc, a fabricação de chocolates assenta, como seria de esperar, na importação de cacau da África e do Brasil; na «Fonte Eléctrique», o fabrico de ácido fosfórico é feito por forno eléctrico à custa de fosforites de Marrocos; e assim por diante.

Na fábrica de alumínio de Chippis, a energia eléctrica (cuja obtenção condicionou em grande parte a situação da fábrica) é obtida numa central privativa aproveitando a queda de água de um lago existente no cume da montanha contígua. Durante todo o inverno, porém, esta grande fábrica faz exclusivamente reparações dos fornos, com que preenche o tempo em que, por não haver degelo, não dispõe de energia eléctrica suficiente.

Ao que nos disseram, o facto passado nesta instalação é de fácil generalização a outras indústrias suíças e mostra-nos que, como parece virá a acontecer em Portugal, a energia eléctrica não tem um carácter permanente; simplesmente, ao contrário do que virá a suceder no nosso País, àparte a escala, é no verão que os suíços dispõem dos grandes mananciais de energia.

b) *Os progressos alheios e as nossas possibilidades*

São três as classes em que se agrupam os objectivos determinantes dos princípios orientadores da reorganização das *indústrias existentes* (1).

— a modernização dos maquinismos e processos fabris;
— o apoio em bases científicas da produção industrial;
— a concentração de unidades industriais dispersas.

Para as *indústrias a instalar,* a norma a seguir, parece ser a de procurar adaptar ao nosso meio os progressos alheios, pelo aproveitamento dos nossos recursos de energia e de matérias primas e pela organização em novos moldes dos *métodos de trabalho.*

O programa dos próximos anos (a delimitação do tempo é sempre muito difícil de fazer nas circunstâncias actuais e no nosso meio) é conhecido com maior ou menor pormenor, no que se refere aos adubos azotados e fosfatados, à cianamida cálcica, ao papel, ao ferro (em parte), etc.

São conhecidos os projectos de instalação da metalurgia do estanho e do volfrâmio,

---

(1) Eng.º Ferreira do Amaral «Os Novos Caminhos da Indústria Portuguesa», pág. 9.

do estudo do álcool carburante, da ampliação das fabricações de cimento e de vidro, da hidrogenação dos óleos, da renovação de indústrias metalo-mecânicas e afins, da fiação do linho.

Acrescentaremos alguns comentários relativos a um reduzido número de progressos alheios, cuja consideração, pelo menos, poderá vir a ser de interesse dentro das nossas possibilidades futuras.

Notaremos desde já que a indústria química, no quadro económico das nações modernas, tem tido um acréscimo de valia nos últimos anos, com posição marcada logo a seguir à agricultura e à produção de energia.

Dentro desta indústria, parece ser matéria assente não convir encorajar de futuro a demasiada especialização das sociedades industriais, devendo cooperar e concentrar-se de modo a permitirem uma exploração racional e integral dos recursos de que dispõem (regionais ou outros). Assim, tem-se insistido recentemente na juxtaposição de indústrias minerais e orgânicas, as primeiras consumidoras de muita energia e as segundas de muitas calorias. O enorme desenvolvimento da I. G. Farben foi, segundo o Dr. Carl Wurster, devido a este princípio de interdependência, como a existente nas fábricas de Ludwigshafen, em particular, onde se via um forno de carboneto de grande capacidade ao lado de uma fábrica de resinas, de borracha por síntese, de còrantes azóicos, etc.

Isto justifica a tendência (já começada a seguir entre nós) para a instalação nas grandes concentrações industriais, de vapor a alta pressão produzindo energia (geralmente em mais de um andar) e distribuindo o vapor às pressões baixas para o fornecimento de calor.

Outra característica geral no progresso da indústria química é a utilização dos sub-produtos, quer pela montagem de indústrias que permitam a sua utilização, quer pela investigação da possibilidade do seu aproveitamento.

Temos já entre nós problemas de interesse e mais teremos à medida que enriquecermos o nosso equipamento industrial. São, por agora, problemas mais ou menos gerais, existentes por toda a parte, e entre eles podemos referir o do aproveitamento do óxido das pirites queimadas (a utilizar na metalurgia do ferro); do cloreto de cálcio do processo Solvay e porventura do fosfato dicálcico; do cloro das electrólises alcalinas; do sulfato de cálcio do ácido fosfórico, etc., etc.

Alguns aproveitamentos de sub-produtos deverão ser, no futuro, a base da instalação de importantes indústrias e só serão, em nossa opinião, resolvidos, quando se entrar decididamente na instalação complementar de indústrias minerais e orgânicas, que referimos atrás.

Em certos casos mesmo, substâncias que constituem para nós sub-produtos, como o ácido clorídrico (provisòriamente, ao que esperamos), passaram a ter papel inverso na maior parte dos países.

No caso do cloro, supomos pensar-se, de momento, no estudo de derivados clorados orgânicos para insecticidas e outras utilizações; noutros países parece prever-se já um acréscimo das necessidades de cloro, por exemplo para a produção de fenol a partir do clorobenzeno. No caso do sulfato de cálcio, a produção prevista é insuficiente para o sulfato de amónio e, além disso, anti-económica a sua utilização; nestas condições, o seu aproveitamento limitar-se-á, pelo menos por agora, à adição a adubos como correctivo.

Estes problemas na indústria orgânica são de maior complexidade e de maior ponderação; por toda a parte existem problemas de utilização de sub-produtos, como o ácido sulfúrico residual das sulfonações, o sulfureto de sódio da fusão alcalina dos derivados sulfonados, o ácido nítrico do excesso das misturas sulfonítricas, etc., etc.

Na referência a alguns problemas particulares, cuja evolução nos poderá interessar mais de perto, quer pela questão em si, quer pela lição que se tira dos processos seguidos,

limitar-nos-emos a citar alguns pormenores, tendo a preocupação de mostrar, sempre que possível, as possibilidades da investigação no aproveitamento de matérias pobres.

No que diz respeito a *combustíveis,* por exemplo, a evolução parece resumir-se nas duas características seguintes:

— capacidades ilimitadas, mas de extracção mais cara;
— necessidade de utilização de combustíveis pobres.

Em países pobres de combustíveis, como o Brasil, a lenha foi nos últimos anos o combustível principal ([1]) tanto para os caminhos de ferro como para a indústria. Neste país, o combustível é cada vez mais caro e difícil de obter, esperando ver a resolução do seu problema no aproveitamento do grande potencial hidroeléctrico que possui. O custo da lenha, com a guerra quadruplicou e o preço do carvão importado subiu de 12 para 30 dólares por tonelada de 1939 para cá.

Os carvões vegetais terão largo interesse no nosso país, sobretudo se a metalurgia do ferro enveredar pelo caminho que parece ter iniciado.

Por outro lado, é sabido que os modernos métodos (hidrogenação e cracking) permitem o aproveitamento dos combustíveis pobres. Segundo Louis Thibaut ([2]) um dos progressos realizados pela «Compagnie Française des Essences Synthétiques» foi o de conseguir efectuar numa mesma operação a hidrogenação progressiva do combustível a tratar e, simultâneamente, o fraccionamento dos produtos obtidos, de modo a retirar do circuito os produtos leves e manter no aparelho, até reacção completa, os produtos pesados, de reacção mais lenta.

Diremos a propósito que, para obter este resultado, a referida companhia aproveitou os trabalhos e indicações da «Société National de Recherches».

Nos Estados Unidos, segundo as informações que nos vão chegando, os processos alemães de síntese têm sido melhorados grandemente com economia apreciável, tendo aumentado muito o número e capacidade das instalações existentes.

A própria queima dos combustíveis sólidos tem evoluído de modo a poder fazer-se sem grande inconveniente a queima dos mais pobres. Esperemos que os «Underfeed Stokers» instalados entre nós e que se experimentarão em breve, correspondam a essa possibilidade, como se prevê.

Dominando, de uma maneira geral, a aplicação dos combustíveis, a sua *reactividade* permite determinar qual a sua utilização mais racional.

Sobre este problema em evolução, publicaram-se já mais de quinhentas memórias; o antigo I. P. de Combustíveis iniciou há cerca de três anos o estudo da reactividade dos carvões vegetais portugueses, sob a direcção do Sr. Prof. Herculano de Carvalho, tendo-se obtido resultados que animavam a continuação do estudo. Ignoramos o motivo da interrupção do trabalho (se efectivamente tal se deu), tanto mais que, no nosso caso, a carboxireactividade tem um interesse especial, quer na gasificação quer no possível aproveitamento no alto (ou baixo) forno eléctrico.

No intuito de esclarecer o problema, além dos trabalhos e compilações de Henri Guérin, os Srs. Delassus, Devaux, Pourbaix, Gottignies, Berger, etc., têm-se recentemente ocupado do assunto, tendo os últimos apresentado uma interessante comunicação ao último congresso de química industrial (Set. 1948).

No que respeita a *metais,* os progressos recentes têm, para nós, alguns aspectos de particular interesse. Não referiremos agora o problema da obtenção da gusa de minérios pobres, de cuja posição nos ocupámos em breve resenha feita anteriormente ([3]). Aliás, não

---

([1]) Robert Longwelle, Westhinghouse Electric Corporation, Fev. 49, pág. 22.
([2]) Chimie et Industrie, Junho 48, pág. 548.
([3]) «O Problema Nacional do Ferro perante as Tendências Actuais da Siderurgia», Técnica n.º 196, pág. 541.

tendo acompanhado suficientemente de perto a evolução do nosso problema, nada sobre ele poderíamos acrescentar.

As referências alheias de maior interesse pela novidade, dizem essencialmente respeito a pormenores de técnica, por onde aliás as coisas, a maior parte das vezes falham. No Bulletin de la Société Industrielle Moulhouse, o Sr. A. G. Lefèvre descreve a evolução do emprego que, desde 1931 tem tido a soda na dessulfuração, evitando adições custosas de manganês; nota as suas vantagens como elemento revalorizador dos minérios considerados demasiadamente pobres e demasiadamente siliciosos, as possibilidades no tratamento directo dos aços por leitos de fusão «sintéticos» à base de soda, etc.

Na Europa, partindo de zero em 1933, o consumo atingiu mais de 100.000 ton. em 1939, correspondendo a 20 milhões de toneladas de gusa tratada.

Recentemente, a «Essex Research Corporation» refere um processo de aperfeiçoamento da dessulfuração da gusa que consiste em fazer passar através da gusa e escória, hidrogénio ou azoto em quantidade suficiente para produzir uma pressão parcial de oxigénio na superfície de separação gusa-escória que seja inferior à que existe normalmente quando o carbono e o oxigénio reagem para formar óxido de carbono, à temperatura de fusão da gusa e à pressão atmosférica, facilitando assim a transferência do enxofre da gusa para a escória.

Outros resultados de possível interesse para os nossos problemas metalúrgicos dizem respeito ao emprego de oxigénio na fabricação do aço (ensaios feitos em especial no Canadá e Estados Unidos) no Siemens-Martin, com economia de combustível, maior utilização de materiais e produção rápida de aços extra-macios, tipo Armco. A Met. Ital. (n.º 39, de 1947) refere-nos também estudos feitos no alto forno com a introdução de ar enriquecido a 30 % de oxigénio.

Outro problema metalúrgico que referimos pelo alcance das suas possibilidades e pelo interesse do processo evolutivo é o da *extracção do alumínio*.

As notícias mais recentes (e a publicidade de um processo novo está normalmente muito atrasada da sua criação) referem-nos como estando já assente, em bases seguras, a extracção do alumínio das argilas e caulinos.

Como se sabe, até 1939 o processo usado industrialmente para a obtenção de alumina a partir da bauxite era quase exclusivamente o processo Bayer, que exigia minérios cujo teor em sílica não ultrapassasse 5 %.

As necessidades da guerra, com limitações de importação, em grande parte feita de França, deram, sobretudo na América, um grande incremento às investigações que se tinham iniciado anteriormente, tendo os trabalhos de A. Ramuz dado a conhecer que o aluminato de cálcio constitui o termo de passagem mais interessante para obtenção de alumina.

Segundo o Sr. Hignet [1] o processo Pedersen modificado, consiste numa calcinação de bauxite com o calcáreo, sendo a mistura de aluminato e silicato de cálcio obtida, tratada por carbonato e bicarbonato de sódio. Numa última fase, a alumina é precipitada por anidrido carbónico seguindo-se a filtração e secagem.

A temperatura da calcinação é da ordem dos 1400° C e o rendimento da extracção de cerca de 95 %, calculando-se o preço da tonelada de alumínio em 47 dólares numa produção de 50 ton/dia e 35 dólares numa produção de 100 ton.

Supomos ter sido este um dos passos mais importantes no aproveitamento das bauxites pobres.

A partir de 1942, o Washington Standards Office estudou, porém, a extracção do alumínio da argila, tendo a fábrica-piloto construída para este fim, funcionado em Maio de 1943.

---

[1] Industrial and Engineering Chemistry, 1947, 39.

Por nos parecer de extremo interesse este problema, reproduzimos a indicação de algumas operações e processos essenciais para a fabricação da alumina partindo da argila.

— calcinação da argila a cerca de 700° C.
— ataque por ácido clorídrico diluído
— filtração
— concentração da solução
— precipitação do alumínio no estado de cloreto hidratado por adição de gás clorídrico à solução concentrada
— separação dos cristais de cloreto de alumínio hidratado
— lavagem dos cristais
— calcinação do cloreto hidratado
— recuperação do ácido clorídrico.

É sabido que a extracção do alumínio exige energia barata, como é sabido que se não pressupusermos esta hipótese não valerá a pena falar em progresso industrial. Mas há, no que acabamos de referir (adentro da limitação a que obriga o tratamento superficial que demos ao assunto) alguns pontos que nos parecem interessantes para um eventual estudo deste problema entre nós. O Serviço de Fomento Mineiro noticia-nos [1] que «se presta assistência técnica no reconhecimento, pesquisa e estudo geológico da vasta região caulínica do distrito do Porto onde existem várias minas e registos mineiros que cobrem uma área de 150 km^2».

Por outro lado, as nossas disponibilidades em ácido clorídrico, da indústria do sulfato de sódio, devem ser extraordinàriamente acrescidas se se vier a dar o incremento desejado à indústria do papel, mesmo com desenvolvimento simultâneo da indústria do rádio.

Aliás, segundo informações do Journal of Research, a preparação da alumina, pelo processo descrito (com 99,6 a 99,8 % de pureza) permite reduzir as perdas de ácido a 10 dol por tonelada de alumina obtida.

A mesma revista indica, como estimativa, que o custo de uma tonelada de alumina na América é de cerca de 12 vezes o da tonelada de caulino, sendo o gasto de combustível cerca de $^1/_{10}$ do preço da alumina obtida.

Não insistiremos, nesta breve referência, noutros pontos do progresso industrial alheio que podem, na sua adaptação ao nosso meio vir a ser ponte que encurte a distância que precisamos percorrer.

Queremos apenas recordar que, para certas indústrias estabelecidas entre nós, é também nítida a linha geral da sua evolução, a que teremos de atender.

Em algumas delas, como a dos adubos fosfatados, procedeu-se a um reapetrechamento cujos frutos estão à vista, que se ressentiu, de uma maneira geral, do desequilíbrio originado pela guerra, além de outras dificuldades do nosso meio.

Ao iniciar-se a amortização de algumas, verifica-se, por este motivo, que a serem postos agora os mesmos problemas ou se não teriam resolvido nas mesmas bases ou sofriam, pelo menos, modificações importantes.

Basta-nos referir, como exemplo, os últimos progressos nas indústrias dos adubos e dos fungicidas, com curiosos aspectos a que teremos de atender e que têm sido anunciados com bastante pormenor.

O esforço feito, pelo menos na indústria inorgânica (que melhor conhecemos) foi, devemos salientá-lo, sob muitos aspectos notável. E dentro de um novo ambiente que se

---

(1) Revista da Ordem dos Engenheiros, n.º 68.

cria, com nova preparação e novos métodos e, sobretudo se tendermos para um mais porfiado esforço — podemos esperar que no bom aproveitamento das instalações existentes se possa encontrar, não só parte da recuperação desejada, mas a dedução das modificações a fazer no rumo norteador da montagem e condução das instalações futuras.

Esperemos que, fugindo às tendências rotineiras e por vezes demasiadamente individualistas do nosso meio, saibamos condicionar a introdução no mercado dos novos produtos de modo a, por um lado evitar desequilíbrio nas indústrias existentes mas, por outro, a não retardar o desenvolvimento desejado para a elevação do nosso nível.

(Continua)

A Mecânica do Solo e as suas aplicações

PELO ENG.º CIVIL (U. P.) MANUEL PIMENTEL PEREIRA DOS SANTOS

Antigo Assistente da Faculdade de Ciências do Porto
Director do Laboratório de Ensaios de Materiais e Mecânica do Solo

(Continuação)

C. D. 624.131

18 — Observações

Deve-se notar que os resultados anteriores (consistência, permeabilidade e índice de absorção) dizem respeito a solos em que se separaram os grãos de diâmetro superior a 1/2 mm. Os gráficos que dão a influência da percentagem de areia permitem-nos ajuizar das modificações que a incorporação deste material vem introduzir.

É bom também desde já assinalar, que, como veremos, a determinação destas características se faz sobre amostras não intactas, pois é necessário manuseá-las. Assim, no solo estas características podem apresentar valores um pouco diferentes dos obtidos no laboratório — portanto estes últimos devem ser considerados como limites inferiores das propriedades estudadas, pois no estado natural o solo estará sempre num estado mais estável.

19 — Problemas sobre consistência e permeabilidade dos solos

A — *Uma amostra de argila tem um limite líquido de 50 °/₀ e um limite plástico de 25 °/₀. A que tipo de argila corresponderá? Será diferente da argila correspondente a outra amostra com limite líquido de 52 °/₀ e limite plástico de 40 °/₀?*

Calculemos o índice de plasticidade da primeira amostra.

$$L_L - L_P = 50 - 25 = 25$$

e da segunda

$$L'_L - L'_P = 52 - 40 = 12$$

A primeira amostra tem um limite líquido de 50 °/₀, que não é elevado, indicando uma proporção considerável de lodo e areia; o limite plástico 25 está de acordo com isto; portanto, muito pròvàvelmente, trata-se de uma argila lodosa.

Também o índice de plasticidade 25, que é baixo, indica a presença em proporção elevada de material lamelar, e de muito pouca ou nenhuma matéria orgânica.

Mas na segunda amostra, o limite plástico tem já um valor elevado, indicando ausência de grãos lamelares ou achatados, e um grau notável de matéria orgânica.

B — *Uma amostra de argila tem uma densidade absoluta de 2,79. No estado natural o seu índice de vazios é de 75 °/₀, e após ser preparada, esse índice baixa para 56 °/₀.*

Quais os limites de retracção em cada caso? Que conclusões se podem tirar dos elementos fornecidos?

Segundo a equação (17), para a amostra natural

$$L_R = \frac{0,75}{2,79} = 0,27 = 27\ \%$$

e para a amostra preparada

$$L'_R = \frac{0,56}{2,79} = 0,20 = 20\ \%$$

Portanto no segundo caso, o volume de vazios é menor, e menor será a percentagem de água necessária para os preencher. A argila no seu estado natural terá grande compressibilidade, não sendo aconselhável para construção de diques, a menos que seja efectuada por camadas delgadas e convenientemente consolidadas.

C — *Uma argila completamente saturada tem um grau de humidade de 45 °/₀ e uma densidade aparente de 1,95. Depois de seca, a sua densidade é de 1,79. Achar a densidade absoluta*

e o limite de contracção para esta argila.

Da equação (6)

$$e = \bar{\omega}\, D = 0{,}45\, \bar{\omega}$$

Da equação (10)

$$d_2 = 1{,}95 = \frac{D + e}{1 + e}$$

resulta

$$D = 3{,}22$$

$$e = 1{,}449 = 144{,}9\,\%$$

De (15)

$$L_C = \frac{1}{\delta_1} - \frac{1}{D} = \frac{1}{1{,}79} - \frac{1}{3{,}22} = 0{,}2475 = 24{,}75\,\%$$

D — *Determinar o gradiante crítico dum solo arenoso de densidade absoluta 2,75 e índice de vazios 95 %.*

De (21)

$$i = \frac{D - 1}{1 + e} = \frac{2{,}75 - 1}{1 + 0{,}95} = 0{,}9 = 90\,\%$$

E — *A água é filtrada através de enchimento de terra duma ensecadeira de 15 m de comprimento e 7,5 m de espessura, sendo a altura de água de 4,20 m acima duma camada impermeável de argila.*

Supondo que a cortina de estacas-pranchas não está suficientemente vedada para retardar o fluxo da água, calcular o caudal de água que passa através da ensecadeira num dia, se

a) o enchimento for uma argila lodosa

b) ou uma areia lodosa com k = 344 cm/min

a) de (21)

$$q = A\,k\,i\,t$$

em que

$$A = 15 \times 4{,}20 = 63\ m^2 = 630.000\ cm^2$$

$$K = 0{,}0000045\ cm/min\,;\quad i = \frac{H}{L} = \frac{4{,}80}{15} = 0{,}64$$

$$t = 1\ \text{minuto}$$

$$q = 630.000 \times 0{,}0000045 \times 0{,}64 \times 1 = 63 \times 0{,}045 \times 0{,}64 = 1{,}813\ cm^3/min = 2{,}65\ \text{litros/dia}$$

b)

$$q = 630.000 \times 344 \times 0{,}64 \times 1 = 138.000.000\ cm^3/min = 200.000\ \text{litros/dia.}$$

20 — A coesão dos solos e a sua origem

Um dos problemas mais importantes da Mecânica do Solo consiste no estudo e interpretação da coesão, ou seja dessa propriedade que por variação gradual caracteriza os diferentes estados possíveis, e aparece como uma atracção entre as partículas impedindo o seu afastamento ou deslizamento.

Quando uma amostra de solo não está submetida a qualquer força exterior, a resistência à separação das partículas traduz-se pela resistência ao corte. Esta propriedade portanto permite-nos, pela sua medida, conhecer a coesão.

Nos sólidos é sabido que a origem da coesão deve ser procurada nas acções intermoleculares. Será o mesmo no caso dos solos?

Ora nos solos coerentes podem aparecer alguns acusando a presença dum ligante sólido das partículas susceptível de explicar a ligação entre estas. Mas uma outra categoria de solos, a mais importante talvez, não apresenta qualquer ligante sólido — é o caso das argilas, areias, etc. Portanto aí parece que o problema da coesão não deverá ser posto nos mesmos termos que no caso dos sólidos.

Uma primeira indicação sobre as possíveis origens do fenómeno pode ser encontrada notando que à medida que diminui a percentagem de água no solo, aumenta a coesão (argilas) ou que, pelo contrário solos desprovidos de coesão, quando secos, apresentam essa propriedade, embora em pequeno grau quando húmidos (areias).

Sabemos portanto já que a água tem influência sobre a coesão; é assim necessário investigar qual o mecanismo dessa acção.

A comparação da coesão de areias molhadas de diferentes diâmetros mostra que a coesão é tanto maior quanto mais finos forem os grãos. Por outro lado, sabemos que as argilas, em que a coesão atinge valores tão altos, são formadas por grãos muito finos. A finura dos grãos tem influência portanto na propriedade em estudo, essa influência traduz-se pela diminuição de dimensões dos canalículos intersticiais — e, por consequência, pelo aparecimento de fenómenos de tensão superficial. Assim se verifica muitas vezes que o nível de água no terreno sobe notàvelmente acima do nível da toalha de água subterrânea sobre a qual este assenta.

Ao lado dos fenómenos de tensão superficial, a atracção molecular não deixa também de desempenhar um importante papel.

Ela explica porque é que uma parede de trincheira composta de grãos arenosos muito finos pode manter-se estável quer quando existe humidade nos canalículos, quer, em certos casos, quando estes estão secos. De resto, essa atracção molecular só se verifica em solos constituídos por elementos tão finos que o seu peso possa ser desprezável em função da intensidade de atracção entre elementos vizinhos. Esta força de atracção designa-se também por atrito sob carga nula ou *atrito a zero,* nos depósitos sedimentares não solicitados por qualquer força exterior.

O mecanismo desta acção foi posto em evidência por Terzaghi, que numa experiência célebre mostrou como nesses depósitos as partículas tombando no fundo, segundo a lei de Stokes, são envolvidas por uma película de água *adsorvida,* cuja espessura é da ordem de 100 microns. As acções de atracção dão-se entre as camadas líquidas adsorvidas, produzindo a adesão entre as partículas.

Chama-se *coesão verdadeira* à característica atrás descrita, resultante das acções intermoleculares. E designa-se por *coesão aparente* à resultante das acções derivadas da pressão capilar da água nos canalículos intersticiais.

Sobre a *coesão verdadeira* pouco diremos, a não ser que ela aumenta em solos sujeitos a compressões, como se compreende, pois que aumenta assim os pontos de contacto entre partículas; e ainda que certos solos (argilas) que foram remexidos, tendem a reencontrar por si a estrutura perdida, por uma espécie de auto-consolidação, traduzida pelo aumento da coesão verdadeira que de novo se aproxima do valor anterior à perturbação do solo. É a *propriedade tixotrópica* da argila, a que já nos referimos.

Retomemos agora o estudo dos fenómenos ligados à pressão capilar.

Vimos anteriormente que ao passo que nos solos argilosos a coesão cresce com a diminuição do grau de humidade, sucede o contrário no caso das areias.

Isto é devido a que no primeiro caso existe uma força que impede a total evaporação da água, força que não é suficientemente forte na estrutura de solos arenosos. É esse, fundamentalmente, o papel da pressão capilar. E o valor elevado que atinge nos solos argilosos explica-se pelo facto das suas partículas serem de forma achatada, deixando portanto intervalos micrométricos entre elas. Esses intervalos diminuem ainda à medida que tem lugar a evaporação de água, traduzindo-se pelo aumento de pressão capilar e pela diminuição da tensão do vapor emitido pelo líquido, em virtude do aumento da curvatura do menisco que forma a superfície livre. Assim se atinge o momento em que as tensões do vapor de água atmosférico é superior à tensão do vapor emitido; a evaporação cessa automàticamente.

Já o mesmo não pode acontecer nas areias, pela forma geralmente arredondada dos grãos; as dimensões dos espaços inter-particulares não atingem os valores mínimos necessários para que se produza o efeito acima.

É possível calcular os valores da pressão capilar, intervindo nestes fenómenos, bem como as dimensões dos meniscos correspondentes à paragem da evaporação.

21 — Efeitos da pressão capilar nos solos

Já vimos que a coesão aparente é a resultante de acções de tensão superficial em fenómenos de capilaridade. Isto pode ser confirmado executando ensaios de compressão sobre amostras impedidas de se dilatarem transversalmente, e verificando que os diagramas de assentamento em função das pressões aplicadas tem as mesmas características para solos coerentes e incoerentes, *desde que o ensaio se faça em presença da água*. As curvas têm equações muito semelhantes diferindo apenas pelos coeficientes. Admitindo que todas as outras propriedades de estado se relacionem com as forças exteriores de maneira idêntica nos dois tipos de solos e nas condições expostas — como aliás a experiência demonstra — e notando que a desaparição da influência da tensão superficial estabelece a identidade dessas propriedades em ambos os casos, é lógico atribuir a coesão aparente àquele factor físico. Esse papel decisivo da tensão superficial pode ser ainda posto em evidência pela experiência seguinte, descrita por Buisson [41].

Tomemos dois cilindros de argila com as mesmas propriedades e dimensões.

Seja um deles posto em presença da água por intermédio dum filtro, e façamos um ensaio de compressão.

A água em excesso é eliminada e o cilindro diminui de volume, correspondendo a cada pressão uma certa percentagem de água.

No outro cilindro, não sujeito a acções externas, deixamos desenvolver-se normalmente o processo de evaporação de água; ele vai também diminuindo de volume. Chega um momento em que a percentagem de água é a mesma nos dois cilindros. A pressão capilar na argila do segundo cilindro é equivalente à pressão exterior aplicada ao primeiro para obter a mesma resistência. A pressão capilar será medida pela resisténcia à tracção da película aquosa superficial, ou seja, como se sabe, de 76,4 dines/cm.

A fórmula de Jurin dá a altura da ascensão de água num tubo capilar de raio r, sendo α o ângulo de concordância do menisco.

Tem-se

$$h = \frac{0{,}0764 \times 2\pi r \cos\alpha}{\pi r^2 \omega} = \frac{0{,}1528 \cos\alpha}{r\,\omega} \quad . \; . \; (22)$$

sendo ω o peso específico da água.

Esta fórmula tem importância, pois fomos conduzidos a considerar o solo como um sistema de tubos capilares compressíveis. Isto permite compreender a retracção da argila. À medida que a água se vai evaporando, há um aumento das forças de tensão superficial, impedindo a água de se retirar para o interior, ao mesmo tempo que a evaporação vai provocando uma diminuição de volume. Consequentemente diminuem as dimensões dos canalículos, o que faz aumentar os efeitos da tensão superficial. Chega um instante em que o sistema entra em equilíbrio de evaporação com a atmosfera; nesse momento as dimensões dos meniscos atingiram o mínimo. A retracção age de forma idêntica em todas as direcções — podemos assimilá-la a uma tensão tri-axial ou a uma pressão hidráulica.

Se mergulharmos a amostra em água, desaparecem os efeitos da tensão superficial e os tubos capilares dilatam-se tendendo para as suas dimensões primitivas.

Segundo as ideias de Terzaghi, estes fenómenos complicam-se ainda pelo aumento de viscosidade da água em virtude de forças moleculares de contacto, e pelo consequente aumento das forças de tensão superficial.

Seja como for, é um facto experimental que no fim da evaporação fica sempre água retida no solo argiloso, água que não é possível expulsar mesmo aumentando a temperatura. Se tal se dá, indubitàvelmente a tensão do vapor saturante emitido deve ser pelo menos igual à tensão atmosférica. Dois factores concorrem para isso. Um deles é o aumento da concentração da solução salina que forma a película superficial; o outro é o fenómeno Kelvin, que relaciona o estado higrométrico com a tensão superficial, densidade do líquido, densidade do vapor saturante e raios de curvatura normais da superfície de separação (meniscos).

Deixaremos de lado por agora o estudo qualitativo do fenómeno, tomando nota de que as tensões desenvolvidas em solos argilosos pela pressão capilar são de elevada ordem de grandeza, mesmo muito mais elevada do que aquelas que resultam das cargas normais dos solos. Essa coesão aparente devida à pressão capilar é susceptível de transformação em coesão verdadeira, pela cristalização de sais dissolvidos que passam a funcionar de cimento sólido.

Num sentido inverso, a coesão molecular das argilas plásticas diminui sensìvelmente pela manipulação da amostra, devido ao facto de as partículas planas que a constituem perderem o seu estado de orientação natural; a argila torna-se mais plástica, fenómeno que é acentuado pela substituição da água de alta concentração salina existente nos interstícios pela água utilizada nos ensaios.

22 — Analogias entre solos coerentes ou não, e corpos sólidos

A diferença entre os dois tipos fundamentais de solos — coerentes e não coerentes — assenta sobre as propriedades da pressão capilar à superfície dos primeiros (argilas); desde que a pressão capilar seja eliminada, as propriedades de resistência de argilas ou areias serão semelhantes, a menos da influência da coesão verdadeira.

Verifica-se experimentalmente que de facto uma amostra de areia submetida a uma pressão uniforme se comporta como uma argila, sob a acção duma pressão capilar equivalente — e mais ainda como um sólido em que as deformações laterais sejam livres.

Podemos concluir que existe uma analogia entre solos e corpos sólidos mais profunda do que se julgaria à primeira vista. O que acontece contudo é que nos sólidos as forças de coesão molecular existem sempre mesmo que não estejam carregados; nos solos incoerentes, essas forças só aparecem sob a acção de cargas. Mas em grande número de categoria de solos, existem como vimos forças devidas a pressões capilares (e de atrito) que desempenham um papel semelhante às atrás citadas.

23 — A medida da pressão capilar e suas aplicações

Sendo o estado hidrométrico definido pelo cociente da tensão p de valor saturante na vizinhança do menisco pela tensão P do vapor sobre uma superfície de água horizontal, é conhecida a fórmula de Lord Kelvin

$$\log_e \frac{P}{p} = \log_e \frac{1}{\eta} = \frac{A\,\partial}{P\,(\Delta - \partial)}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \quad . \; . (23)$$

sendo A a tensão superficial (75 dines/cm), ∂ a densidade do vapor saturante e Δ a densidade do líquido.

R_1 e R_2 são raios de curvatura principais da superfície do menisco.

Atendendo à expressão de Laplace

$$\omega = A\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . (24)$$

que dá a diferença de pressões entre o exterior e interior da superfície de separação, tem-se, sendo $R_1 = R_2$ num menisco esférico, e desprezando ∂ em face de Δ na diferença $(\Delta - \partial)$:

$$\log_e \frac{1}{\eta} = \frac{\omega\,\partial}{\Delta\,P} \quad . \; . \; . \; . \; . (25)$$

ou

$$\omega = \frac{\Delta \,.\, P}{\partial} \log_e \frac{1}{\eta} \quad . \; . \; . \; . (26)$$

que dá pràticamente a pressão sobre o menisco (na realidade a diferença de pressões).

A temperatura de 15°, $\partial = 1{,}26 \times 10^{-5}$; $P = 12{,}7$ mm de mercúrio $= 17{,}14$ gr/cm^2.

$\Delta = 1$. Tem-se então aproximadamente:

$$\omega = 1.300 \log_e \frac{1}{\eta} \text{ Kg/cm}^2 \quad . \; . \; . (27)$$

Entrando com a percentagem molhada por cm^2 chega-se à pressão real teórica, que se afasta da medida pelo facto da variação de concentração dos sais dissolvidos variar muito de ponto para ponto.

É possível, como indicaremos no capítulo seguinte medir experimentalmente a pressão capilar. As suas aplicações são numerosas como vamos mostrar pelos seguintes exemplos indicados por Buisson [41].

a) Um muro de suporte suporta um aterro argiloso que, a quando da construção, se apresentava consistente. Nenhum impulso era exercido pelo muro, e inclusivamente a carga devida ao peso próprio era absorvida pela resistência à compressão da argila.

Durante a estação seca, produzem-se efeitos de retracção, e consequentemente fractura do maciço. As fendas que começam à superfície vão progredindo em profundidade provocando uma separação em prismas verticais.

Começa a estação húmida. As primeiras chuvas podem encher as fendas provocando sùbitamente sobre o muro um impulso igual ao da pressão hidrostática.

Em seguida a argila dilata-se tendendo para a sua consistência primitiva, exercendo novas acções sobre o muro. Se as chuvas se prolongam, a água presente no solo pode ser tanta que o impulso exercido no muro iguale no limite a pressão capilar. Se o deslocamento do muro atingir proporções graves antes que se estabeleça o equilíbrio entre o impulso das argilas e a resistência deste, um desastre é de temer.

A intercalação dum maciço de pedras secas entre o aterro e o muro é de aconselhar, pois a argila pode inchar nos vazios dessa cortina protectora, diminuindo portanto a acção sobre o muro.

b) Abriu-se uma trincheira em argila compacta, de boas características de resistência. O talude escolhido foi por consequência de 1/1, e a altura não excedia 4 m.

Começaram a aparecer fendas na parte superior do talude e passados alguns dias deu-se o deslizamento do maciço correspondente. Verificaram-se planos de deslizamento na parte inferior do talude, e mesmo de 1,50 m abaixo do nível da escavação. Qualquer das teorias sobre deslizamento de maciços (Resal, Frontard, Caquot) não poderia indicar o que se viria a passar.

As investigações feitas descobriram a existência duma canalização em mau estado que, passando atrás do talude, produziu a dilatação da argila, cujo impulso não pode ser absorvido pelos maciços superficiais. Mas também se concluíu que o efeito produzido era dependente não só de dilatação da argila como ainda dos efeitos da pressão capilar.

23 — Resistência ao corte nos solos arenosos

Uma outra importante característica dos maciços terrosos é a sua resistência no corte.

Essa resistência ao corte T por unidade de superfície é, segundo Coulomb, caracterizada pela fórmula célebre:

$$T = c + N \operatorname{tg} \varphi \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (28)$$

em que

c = coesão aparente

N = pressão normal

φ = ângulo de atrito interno

A coesão aparente, é como já vimos, aproximadamente nula no caso das areias secas, e sempre pequena, embora com valores já apreciáveis no caso das areias húmidas. A fig. 17 indica os dois casos. Vemos

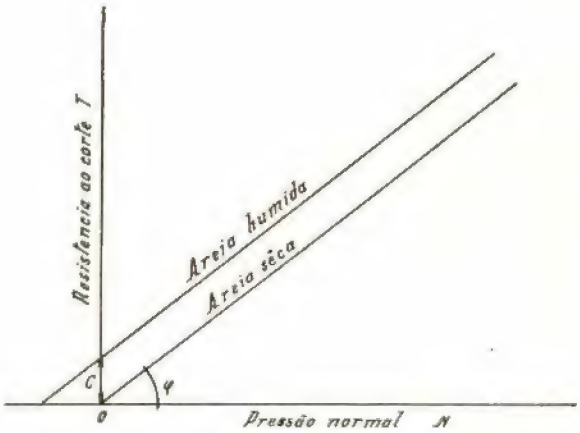


Fig. 17

que a coesão c representa em última análise a resistência ao corte quando o solo não suporta qualquer pressão.

A fórmula de Coulomb pressupõe que o *ângulo de atrito interno* φ seja uma cons-

tante do material. Vamos examinar mais de perto esta hipótese, comparando-a com os resultados experimentais, para concluirmos até que ponto a expressão de Coulomb exprime a realidade.

Devemos por consequência começar por examinar justamente a noção de *atrito interno*. Os grãos que constituem um corpo pulverulento, tal como as areias, apresentam entre si ou com uma superfície sólida uma pequena área de contacto. Consequentemente, existirá sempre uma forte pressão de contacto nos casos da prática, arrastando a existência de tensões tangenciais importantes traduzindo os efeitos de atrito. Lembremos que num corpo sólido essas tensões tangenciais t se relacionam com as pressões normais n pela fórmula

$$t = f \cdot n$$

em que f representava o coeficiente de atrito, dependente por sua vez de numerosos factores. Mas agora o fenómeno complicou-se pois os esforços tangenciais não tenderam apenas a provocar a translação relativa das partículas, mas também a sua rotação. E a resistência oposta ao rolamento dependerá da estrutura do solo considerado: forma das partículas, a forma do seu arranjo mais ou menos encastradas umas nas outras.

Ainda mais: ao passo que se vai dando o seu deslocamento é de prever, e a experiência confirma-o, que os grãos tendem a dispor-se de forma a apresentarem o mínimo de resistência. Isso corresponde, no caso de partículas planas como das argilas, à disposição de faces como as folhas dum livro, correspondendo a um máximo de compacidade. A condição aparece diferente no caso de grãos arredondados, traduzindo-se pela formação duma zona plástica na região do plano de escorregamento, provocando uma variação de volume. Chamamos *plano de ruptura,* ao lugar geométrico das trajectórias das partículas ao longo das quais se atingem simultâneamente as condições de ruptura.

No estado actual dos nossos conhecimentos, ainda não é possível afirmar se existe uma lei teórica de ruptura válida em todos os casos — ou melhor, se as leis teóricas estabelecidas têm de facto carácter geral. É matéria de experiência, que poderá fornecer a decisão neste capítulo. Apenas no caso da superfície de escorregamento se tornar aparente (muros de suporte, deslizamento de taludes) tem sido efectuados ensaios sistemáticos; mas as conclusões podem ser falseadas por múltiplos elementos perturbadores que tornam delicadas as pesquisas a efectuar.

Deixando para o capítulo seguinte a análise das técnicas de ensaio, vamos reunir os principais resultados experimentais para ajuizarmos da sua influência sobre a expressão das leis de Coulomb.

Os elementos que influem a resistência ao corte no momento da ruptura são, nesta ordem de ideias, os seguintes:

a) *A compacidade* do solo, definida como a relação entre o volume real e o volume aparente do solo, e fàcilmente expresso em função do índice de vazios ou da porosidade. Os ensaios de Duriez e Lucas [40] põem em evidência a influência deste factor na expressão da lei de Coulomb, mostrando que as curvas características $T = f \cdot n$ — rectas segundo Coulomb — tem na realidade forma parabólica, traduzindo uma variação do ângulo de atrito interno não sòmente com a compacidade do solo estudado, mas também com as cargas. A fig. 18 indica um dos feixes de curvas características correspondentes a areias secas. O feixe é limitado superior e inferiormente pelas curvas correspondentes às compacidades máxima e mínima que é possível obter.

Os ensaios com as areias completamente saturadas conduziram a resultados da mesma natureza. Já o mesmo não acontece com areia parcialmente saturada, em que aparece água e coesão aparente; a fig. 19 dá os elementos de comparação num caso.

b) *A amplitude de deformação:* conforme a deformação no momento de ruptura é maior ou menor (podendo mesmo a deformação ser impedida) assim variará o valor da tensão de ruptura ao corte.

As curvas respectivas diferem conforme se trata de areias compactas ou não.

c) *A velocidade de carga:* quanto mais

rápida for a aplicação da tensão de corte, tanto maior é o valor correspondente à ruptura. Este fenómeno deve ser tido em conta nos ensaios.

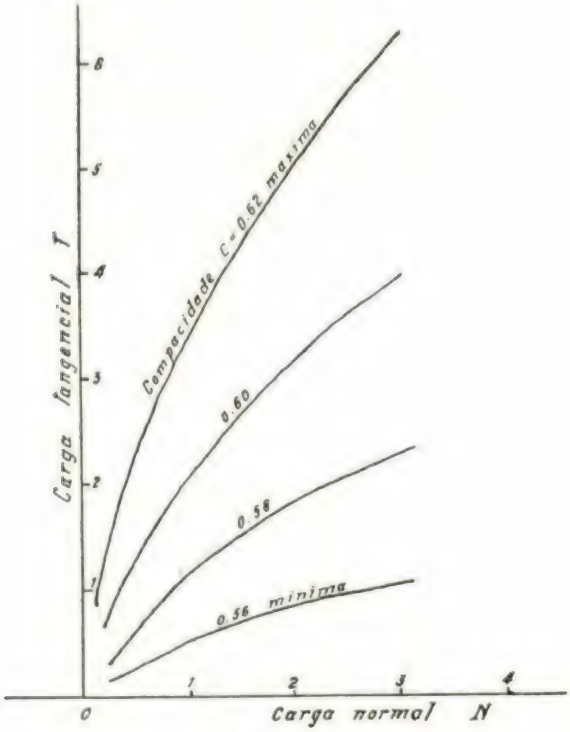


Fig. 18

(Duriez e Lucas [40] pág. 328)

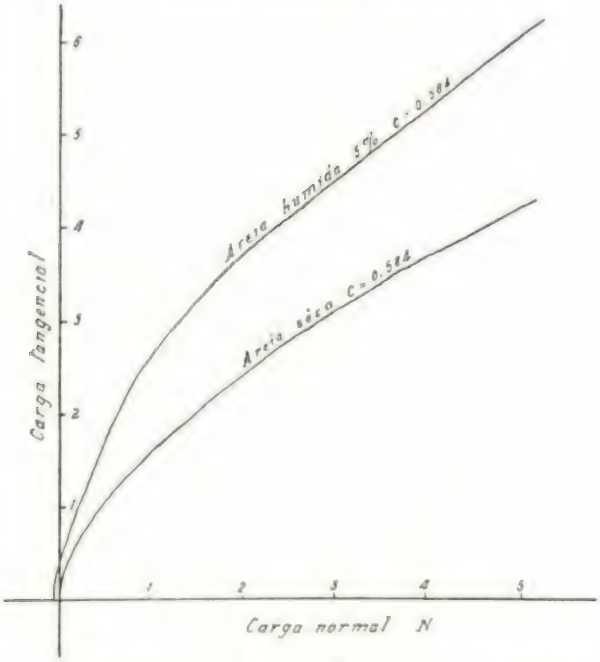


Fig. 19

(Duriez e Lucas [40] pág. 328)

d) *A existência dum plano de escorregamento:* quando o solo foi primeiramente levado à ruptura e depois descarregado, uma nova carga produzirá a ruptura sem deformação sensível: a primeira deformação é permanente.

e) *A espessura do solo interessada no deslocamento:*

A influência de todos estes factores importantes mostra como é difícil precisar a noção clássica do ângulo de atrito interno.

No entanto esta noção é de emprego cómodo e corresponde sensìvelmente aos resultados experimentais. Existem ensaios que permitem, como veremos, a determinação do seu limite inferior. Procedendo com este nos cálculos, estaremos certamente em condições de segurança. Verifica-se que o seu valor é sensìvelmente também o do ângulo de talude natural obtido pela descarga vertical de areia duma pequena altura.

Seja como for, conhecido o valor mínimo do ângulo de atrito interno, podemos assimilar em condições de segurança a curva intrínseca do solo à recta correspondente. Admitindo como critério de ruptura o de Mohr — círculo de Mohr tangente à curva intrínseca — estamos em condições de avaliar quais as cargas que podem produzir a ruptura por corte do terreno.

A fig. 20 ilustra um exemplo de aplicação do diagrama de Mohr. Estabelecida como curva intrínseca a recta PA, e sendo o ponto A, correspondente ao esforço N' T', o representativo da ruptura, é possível achar quais as tensões principais de ruptura N_1 e N_2, traçando o círculo tangente à curva intrínseca em A, de centro em PD.

Podemos verificar que sendo

$$\overline{PD} = \overline{PO}\,(1 + \operatorname{sen} \varphi)$$

$$\overline{PB} = \overline{PO}\,(1 - \operatorname{sen} \varphi)$$

será

$$\frac{\overline{PB}}{\overline{PD}} = \frac{1 - \operatorname{sen} \varphi}{1 + \operatorname{sen} \varphi} = \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$$

ou

$$\frac{N_1}{N_2} = \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$$

A condição de ruptura traduz-se portanto pela condição de que a razão das tensões principais produzidas no solo pela carga, seja inferior a

$$tg^2\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)$$

Inversamente :

$$\frac{N_2}{N_1}=tg^2\left(\frac{\pi}{4}+\frac{\varphi}{2}\right)$$

São as condições de Rankine do equilíbrio inferior e superior respectivamente, dos maciços terrosos.

Note-se que qualquer outro círculo de centro no eixo das abcissas e tangente à curva intrínseca pode igualmente fornecer valores de N e T que não podem ser excedidos sob pena de ruptura. É o que se traduz na fig. 21.

No caso de ensaios triaxiais, a condição de ruptura é ainda a mesma, mas o círculo interessante é a tangente aos círculos traçados sobre as 3 tensões principais, como a mostra a fig. 22. O ponto figurativo dos estados possíveis de tensões (N, T) em lugar de poder ser localizado sobre um círculo pode ser localizado sobre a área tracejada. O círculo exterior dá os limites admissíveis sem ruptura.

24 — Resistência ao corte nos solos argilosos

O estudo das tensões de corte é ainda mais complicado que no caso das areias. Isso é devido sobretudo às propriedades características da argila, que se traduzem pelos efeitos que vamos analisar.

A *impermeabilidade* deste tipo de solos acarreta uma variação da resistência ao corte com tempo. Resulta tal facto de as tensões de corte introduzidas provocarem um aumento nas causas da compressibilidade, que não podem ser seguidas imediatamente pela correspondente diminuição de volume visto a água não poder ser instantâneamente expulsa. Com o tempo aumenta a compacidade e consequentemente a coesão.

A *viscosidade* da argila provoca diferenças importantes na grandeza da força necessária para a ruptura por corte, em condições idênticas de humidade, conforme a velocidade de aplicação da carga. Num ensaio rápido essa força tem maior valor. Também já tivemos ocasião de nos referirmos às

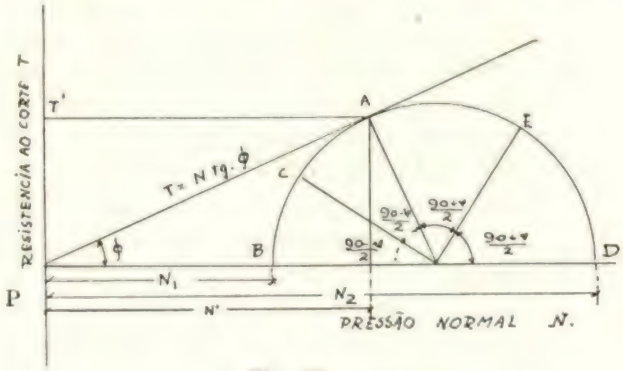


Fig. 20

(Reynolds e Protopapadakis [33] pág. 141

propriedades tixotrópicas, que determinam a consolidação lenta da argila sem variação da quantidade de água, conduzindo assim a nma forte variação da coesão com o tempo.

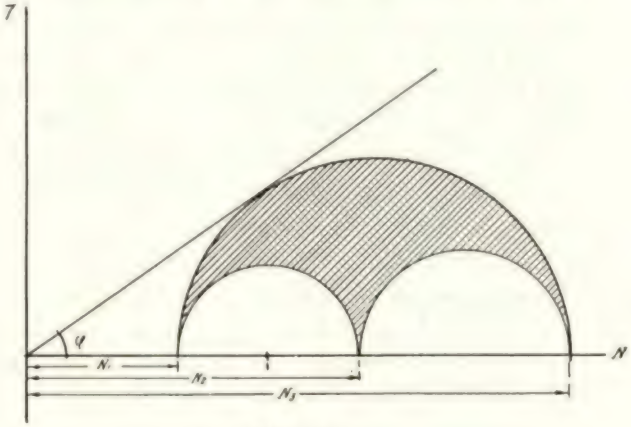


Fig. 22

(De Beer [44])

Compreende-se portanto como se torna difícil tanto o estudo teórico como o experimental desta categoria de fenómenos. E no entanto torna-se necessário conhecer em que limites é válida a clássica fórmula de Coulomb.

$$T = c + N\ tg\ \varphi$$

O longo estudo experimental que exige a compreensão dos fenómenos de corte nas argilas culminou com a apresentação em 1936 por Hvorslev das conclusões tiradas de ensaios de extrema delicadeza e precisão.

É sobretudo a estes resultados que nos referiremos em seguida, deixando de lado, pela sua extensão incompatível com os limites deste trabalho, os detalhes das experiências. Seguiremos a exposição de Buisson [41].

Em primeiro lugar notemos que a maior das muitas dificuldades na interpretação dos ensaios era a impossibilidade de avaliar qual a *pressão efectiva* exercida nas amostras.

Com efeito suponhamos a amostra colocada sobre uma pressão normal N. Apliquemos-lhe uma tensão de corte no plano perpendicular àquela. Como a água dos poros não tem resistência ao corte, esta tensão é instantânea e exclusivamente transmitida ao solo, provocando a deformação deste (geralmente uma contracção de volume, mais raras vezes uma dilatação, no caso de solos muito densos).

No caso da diminuição de volume, este traduz-se por uma diminuição de vazios — e uma parte n da pressão N será tomada pela água. A pressão efectiva passa a ser $N - n$ e se o ensaio for suficientemente lento, dá-se a consolidação, com a correspondente expulsão da água, e tendendo n a anular-se. Se, como é costume, referirmos o ensaio à pressão N, cometemos um erro, tanto maior quanto mais rápido for o ensaio. Para os vários ensaios com as pressões N, N', N'', etc. a linha unindo os pontos figurativos no diagrama (T, N) conduz a um valor de coesão e geralmente também do ângulo de atrito interno, diferentes do

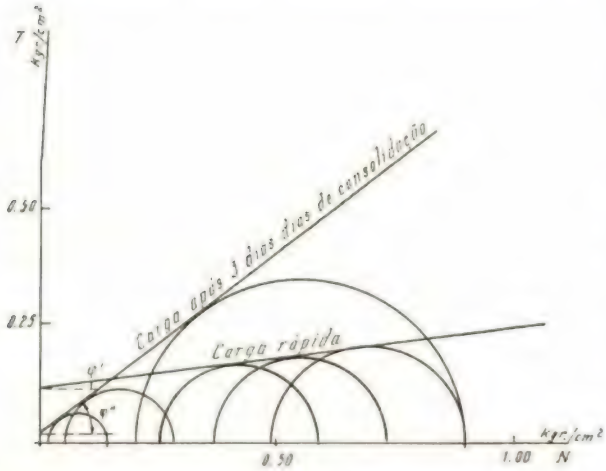


Fig. 22

(de Beer [44];

que se obteria tomando para pressões efectivas os valores reais $N - n$, $N' - n'$, $N'' - n''$, etc.

Salvo o sinal, as coisas são semelhantes no caso mais raro dos solos se dilatarem sob a acção da tensão de corte. Agora as pressões efectivas serão $N + n$, $N' + n'$, $N'' + n''$, etc.

Tudo isto está muito bem, mas o que acontece na prática é que a determinação dos valores de n, n', n'', etc. é extremamente difícil, para não dizer impossível.

Por isso, temos de recorrer a ensaios tão lentos que permitam a consolidação das amostras, e portanto, em que sejam nulos os valores das sub-pressões ou sobre-pressões n. Convêm no entanto notar que obtemos assim valores da resistência ao corte mais elevados, pois a superfície de contacto das partículas aumenta, diminuindo portanto em cada grão a pressão unitária e aumentando a resistência ao corte. É o que a experiência de facto indica.

Mas em muitos fenómenos reais, como os que se passam em solos suportando fundações, a carga estabelece-se ràpidamente; o ensaio lento só pode ter valor, desde que seja especificada a percentagem de água correspondente.

Além disso, o ângulo de atrito assim determinado varia também com as condições do ensaio. Ora para que esse ângulo tenha significado físico é necessário que o seu valor se aproxime do deduzido do ângulo dos planos de ruptura à compressão dum cilindro de solo homogéneo e isótropo, ângulo cujo valor é, segundo Morh, $\frac{\pi}{2} - \varphi$.

Esta comparação só se pode fazer mediante ensaios em que se conheçam as tensões principais efectivas, e portanto a pressão hidrostática na água das amostras.

O aparelho de Redulic permite efectuar ensaios dessa natureza e confirmar a lei fundamental da transmissão das pressões nas argilas — as tensões são em cada instante transmitidas em parte à água e em parte ao solo. Tem-se, sendo p a pressão hidrostática e σm as tensões principais medidas.

$$\sigma_1 = \sigma_{m_1} - p$$

$$\sigma_2 = \sigma_{m_2} - p$$

$$\sigma_3 = \sigma_{m_3} - p$$

para os valores das três tensões principais.

Mas também foi possível concluir a existência duma forte divergência entre os valores do ângulo de atrito interno deduzidos dos ensaios de corte e o resultante dos ensaios de ruptura à compressão de cilindros.

Foi Hvorslev quem forneceu a chave do enigma. Ele mostrou de forma convincente que obtínhamos para os valores de ϕ números convenientes se considerássemos, além duma mesma consistência das amostras, definida pelo mesmo grau de humidade, um mesmo índice de vazios em cada amostra. Só assim a linha obtida representará a curva intrínseca — envolvente dos círculos de Mohr.

Note-se que já Resal tinha tido até certo ponto essa intuição, pois fez salientar que a equação de Coulomb se aplicava a uma argila de *consistência determinada*. Hvorslov vai mais longe: a equação relaciona *estados diferentes* da argila, ligados apenas por uma percentagem constante de humidade.

A equação das rectas obtidas segundo esta hipótese, e correspondendo a diversos índices de vazios *e*, será da forma.

$$T = f(e) + (N - n)\,\mathrm{tg}\,\varphi \quad . \; . \; . \quad (30)$$

Nesta nova expressão geral da lei de Coulomb, pode pôr-se geralmente

$$f(e) = k \,.\, N_e$$

em que *k* designa o chamado *factor de coesão* (nulo no caso das areias) e N_e a pressão que corresponde à consistência *e* (ver fig. 23 — ramo 1).

Terzaghi, numa comunicação ao Congresso de Urbanismo Subterrâneo, indicou um processo experimental prático. Toma-se para abcissas $N - n/N_e$ e para ordenadas T/N_e.

As rectas obtidas em tal sistema de coordenadas fazem um ângulo ϕ com a horizontal, e a sua ordenada na origem é justamente k. O ensaio necessário efectua-se partindo do *limite líquido* e efectuando a aplicação das tensões de corte ao longo do ciclo de histérese respectivo (compressão e descompressão).

Obtém-se assim uma série de curvas, e levando a um diagrama de Terzaghi os pontos dessas curvas que correspondem a um mesmo índice de vazios obtém-se as rectas de equação (30). É o que mostra a fig. 23.

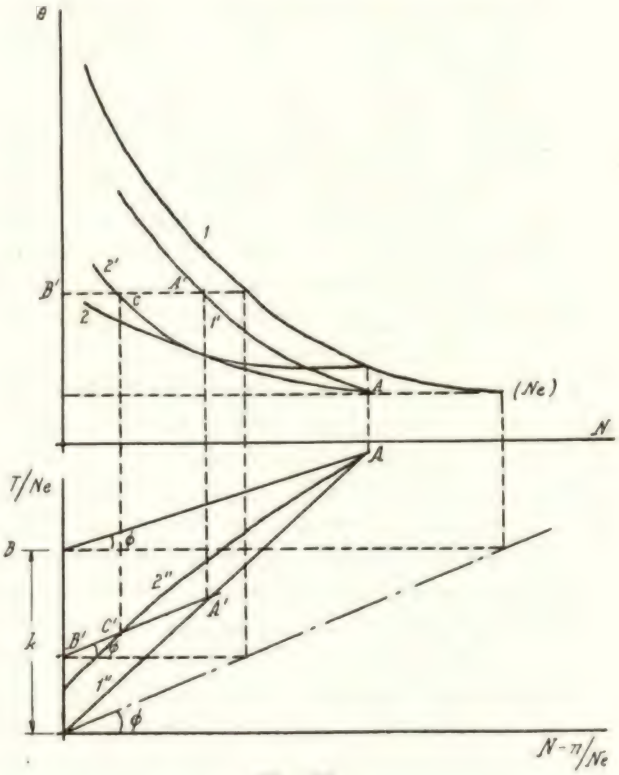


Fig. 23

(Buisson [41] pág. 142)

Nestas, as curvas 1 e 2 são as curvas de compressão e descompressão (obtidas no edómetro); as curvas $1'$ e $2'$ as obtidas no aparelho de ensaio de corte; $1''$ e $2''$ são curvas de Terzaghi correspondentes. Os pontos A' B' e C' estão numa recta de coef. angular $\mathrm{tg}\,\varphi$.

Resta ainda elucidar um ponto delicado. A equação de ruptura apresenta duas grandezas constantes k e φ e duas variáveis $(N - n)$ e N_e. Determinadas as primeiras como se avaliarão $(N = n)$ e N_e?

Para um certo número de casos particulares, Terzaghi e Fröhlich encontraram a resolução do problema. Mas os casos considerados obedecem à condição de o solo ser lateralmente limitado e a corrente de água

ser perpendicular às superfícies de separação paralelas.

Ora em muitas circunstâncias da prática isso não se dá.

Nessa direcção ainda não existem resultados completamente satisfatórios, mas pode proceder-se por um método cuja aproximação é suficiente.

Já vimos que quando da aplicação das cargas exteriores o solo pode diminuir ou aumentar de volume com o tempo, sendo a segunda hipótese raras vezes verificada.

Quando a carga se faz ràpidamente — é o caso das fundações — e há diminuição de volume com o tempo, a estabilidade aumentará com o tempo se estiver assegurada de início. A pressão efectiva $p_1 = N_1 - n$, a impor deve ser inferior a $k p_2$, sendo p_2 a pressão efectiva *antes da carga*. Se houver aumento de volume, a condição toma outro aspecto, pois a estabilidade diminui com o tempo. Agora p, deve ser inferior k p'_2 sendo p'_2 a pressão efectiva *após a estabilização*.

Este último caso, que é como se disse mais raro, não deixa de ter grande importância. Quando as tensões são quase exclusivamente de corte puro, não há comparação entre o aumento de resistência devido à compressão, e diminuição provocada por essas tensões. Isso acontece em taludes argilosos de grande altura, e também na cravação das estacas, provocando o bem conhecido fenómeno da diminuição ou do aumento da nega depois do repouso da cravação. Trata-se no primeiro caso dum fenómeno de corte, provocando uma tendência ao aumento de volume contrariada pela lentidão da transmissão das modificações internas por atrito e pela dificuldade da expulsão da água em solos impermeáveis. Desde que se deixe repousar a estaca, provocam-se estes fenómenos e a resistência à cravação aumenta.

O segundo caso, pelo contrário, explica-se pela natureza do solo ser da correspondente a uma diminuição de volume por corte, contracção que exige também um certo tempo.

Para terminar o parágrafo, apresentemos os resultados dum ensaio feito no Laboratório de Gand sobre uma argila, mostrando a influência da consolidação (fig. 24). Os

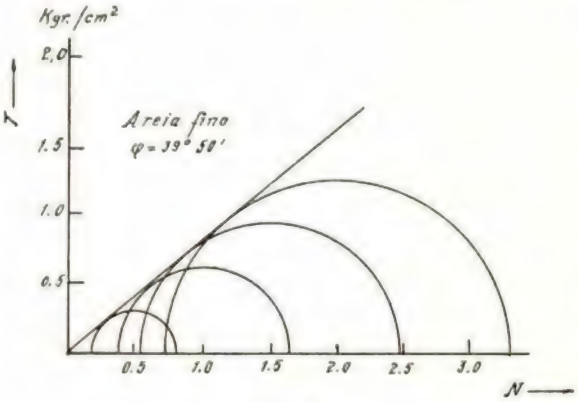


Fig. 24
(De Beer [41])

ângulos aparentes de atrito interno φ' e φ'' são muito diferentes, como se verifica. Os seus valores são $\varphi' = 7^\circ\ 30'$ e $\varphi'' = 37^\circ\ 50'$.

25 — Problemas sobre tensões de corte

A — Durante um ensaio de corte executaram-se as seguintes leituras:

$T_1 = 7{,}5$ gr	$N_1 = 5{,}0$ gr
$T_2 = 10$ »	$N_2 = 10{,}0$ »
$T_3 = 12{,}3$ »	$N_3 = 15{,}0$ »
$T_4 = 15{,}0$ »	$N_4 = 20{,}0$ »

As dimensões da caixa são:

Altura 7,5 cm, comprimento e largura 5 cm.

Traçar o gráfico dos resultados e deduzir dele o ângulo de atrito interno e a coesão.

O gráfico pedido é o da fig. 25.

Admitindo a validade da lei de Coulomb nas condições do ensaio, resulta

$$\varphi = 26^\circ$$
$$c = 5 \text{ Kgr}$$

Utilizando as equações simultâneas obtidas com a 1.ª e 4.ª leituras:

$$7{,}5 = c + 5 \text{ tg } \varphi$$
$$15{,}0 = c + 20 \text{ tg } \varphi$$

resulta também

$$15 \text{ tg } \varphi = 7{,}5$$
$$\text{tg } \varphi = 0{,}5 \qquad \varphi = 26^\circ\ 30'$$
$$c = 7{,}5 - 5 \times 0{,}5 = 5{,}0 \text{ Kgr}$$

ou

$$0{,}2 \text{ Kgr/cm}^2.$$

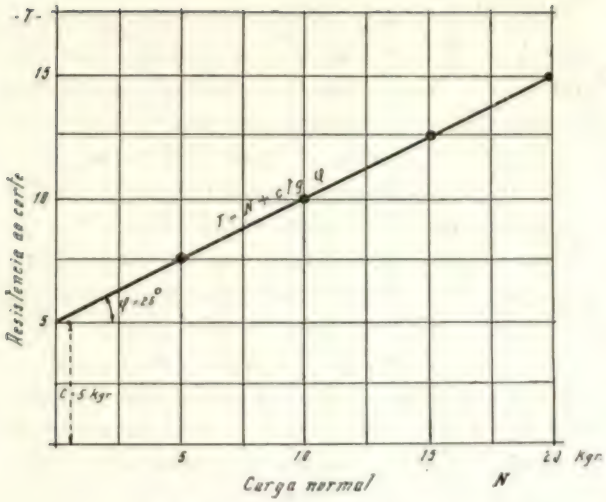


Fig. 25

(De Beer [44])

B) *Efectuou-se uma série de ensaios de corte em amostras de diferentes solos com os resultados seguintes:*

Ensaio	T	N
Solo A — Ensaio 1	9,0 kg	2,5 kg
» 2	9,5 »	5,0 »
» 3	11,0 »	10,0 »
Solo B — Ensaio 1	6,2 »	10,0 »
» 2	9,2 »	15,0 »
» 3	14,0 »	32,5 »
Solo C — Ensaio 1	6,0 »	12,5 »
» 2	6,1 »	20,0 »
» 3	6,2 »	25,0 »

A área da amostra submetida ao esforço de corte é de 10 cm². Traçar os gráficos e deduzir os valores de c *e de* ϕ, *indicando as prováveis naturezas dos 3 solos.*

Os gráficos estão indicados na fig. 26. Vemos que:

Solo A: c = 8 Kgr ou 0,800 Kg/cm²
$\phi = 14°$

Solo B: c = 0,0 Kg
$\phi = 32°$

Solo C: c = 5,5 g ou 0,550 Kg/cm²
$\phi = 1°$

O solo A tem coesão e ângulo de atrito elevados: será provàvelmente uma argila arenosa.

O solo B tem coesão nula e atrito interno elevado: provàvelmente é uma areia.

O solo C tem coesão apreciável, mas um ângulo de atrito interno muito pequeno: deve tratar-se duma argila lodosa.

26 — Compressibilidade dos solos

A primeira contribuição importante para o estudo da acção das cargas normais sobre os solos é devida a Boussisneq, que em 1885 publicou a resolução do problema da determinação dos esforços provocados num corpo semi-indefinido por uma carga concentrada num ponto do seu contorno.

Considerando coordenadas esféricas, estabeleceu as condições diferenciais de equilíbrio dum elemento de volume (fig. 27) che-

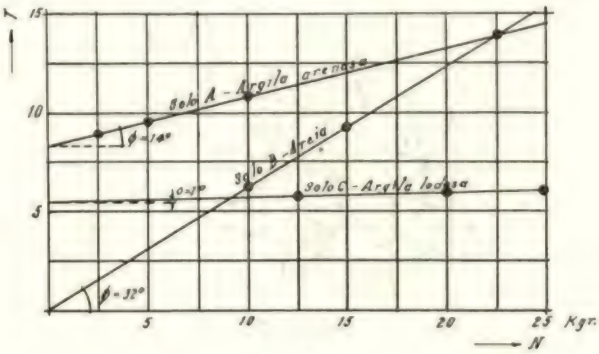


Fig. 26

(Reynolds e Protopapadakis [53] pág. 141

gando às expressões clássicas dos esforços num ponto do interior do corpo.

$$\sigma_z = -\frac{3\,P}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{R^5}$$

$$\sigma_r = -\frac{P}{2\pi}\left\{\frac{3\,z\,r^2}{R^5} - \frac{1-2\,m}{R\,(R+z)}\right\}$$

$$\sigma_t = +\frac{P}{2\pi}\,(1-2\,m)\left\{\frac{z}{R^3} - \frac{1}{R\,(R+z)}\right\}$$

$$\tau_t = -\frac{3\,P}{2\pi} - \frac{r\,z^2}{R^5} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (31)$$

em que *m* é o inverso do módulo de Poisson $\frac{1}{m}$.

Vê-se imediatamente que:

a) os esforços são independentes do módulo de elasticidade E;

b) os esforços σ_z e σ_t são independentes de quaisquer constantes elásticas;

c) para sólidos incompressíveis (m = 2) anulam-se todas as componentes dos esforços num ponto excepto a dirigida radialmente, sendo portanto as isostáticas rectilíneas e radiais.

Evidentemente que na Natureza, as hipóteses basilares de Boussisnesq (sólido elástico, homogénio e isotrópico) não são satisfeitas.

Mas nem por isso as expressões a que chegou deixam de nos ser úteis.

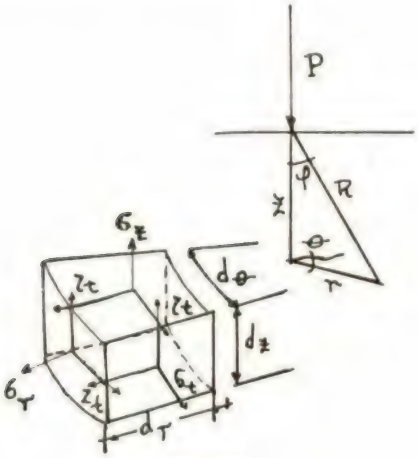


Fig. 27

(Jennings [48] pág. 150)

A integração das equações de Boussisnesq, para ter em conta cargas uniformes, triangulares ou trapezoidais foi recentemente conseguida. A fig. 28 mostra a distribuição de esforços máximos devidos a uma carga triangular indefinida. A fig. 29 mostra, para carga concentrada, e nas hipóteses atrás indicadas, o traçado das *isóbaras* (linhas de igual pressão) que formam o chamado bolbo das pressões. Finalmente, a fig. 30 indica o aspecto das mesmas linhas para carga uniforme. Vê-se que uma das famílias de isostáticas é formada por elipses homofocais, de focos A e B extremos da zona carregada.

A outra família, ortogonal àquela, é formada por hipérboles, cujos focos são precisamente os mesmos pontos.

As isóbaras são circunferências passando por A e B. Note-se que à medida que nos afastamos da zona carregada, as elipses isostáticas tendem para círculos do centro *O* e a hipérboles para as suas assíntotas.

As isóbaras tendem para circunferências tangentes em *O* ao contorno horizontal.

Nas expressões (31) e noutras semelhantes estabelecidas para outros casos da carga, *m* varia teòricamente desde 2 (terrenos incompressíveis até infinito (absolutamente compressíveis). Para os esforços estudados, a experiência mostra que se pode tomar 2 ou 3. As observações rigorosas de Cummings indicam para valor de *n* na expressão geral:

$$\sigma_z = \frac{n\,P}{2\pi\,R^2}\left(\frac{z}{R}\right)^n \quad . \; . \; . \; . \quad (32)$$

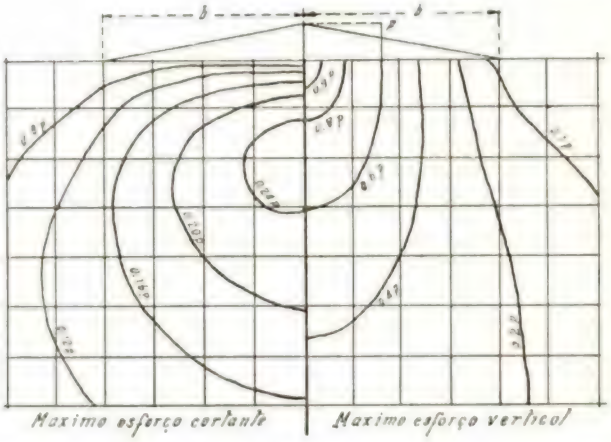


Fig. 28

(Jennings [48] pág. 150)

(material homogéneo e isotrópico) o valor n = 6 no caso dos solos. Tem-se assim em conta a não perfeita elasticidade dos solos, ao passo que as condições de homogenei-

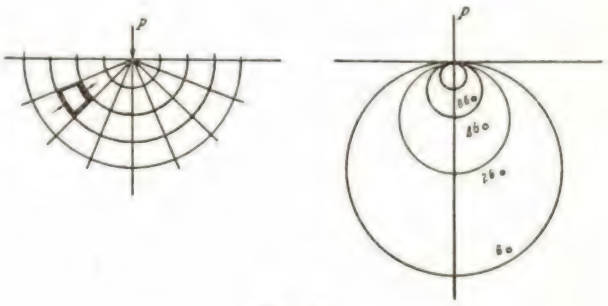


Fig. 29

(Azangoá [75] págs. 204, 206)

dade e isotropia são asseguradas — a primeira tomando a média dum grande número de ensaios, a segunda executando esses ensaios na mesma direcção do esforço aplicado.

A Mecânica do Solo retomou o problema da compressibilidade de solos em bases novas, dentro das indicações experimentais enquadradas no conjunto teórico já existente, e ainda, de certo modo em evolução.

Vamos agora indicar os principais resultados obtidos, que entre outras notáveis aplicações conduziram a prever, com suficiente aproximação, os assentamentos das fundações.

27 — Compressibilidade das areias e argilas

Um dos primeiros factores que tem influência nas condições de compressão de solos é a sua granulometria. Assim, um solo de granulometria uniforme aparenta maior compressibilidade do que um outro em que aquela seja mais extensa; por outro lado a percentagem de finos tem a sua importância, pois traduz-se por um maior índice de vazios susceptível de redução pela acção das cargas. Compreende-se portanto desde já que as argilas sejam mais compressíveis que as areias.

Mas essa diferença entre as duas classes de solos é ainda mais acentuada pelo facto da forma achatada das partículas argilosas. Isso conduz à formação de certas arquitec-

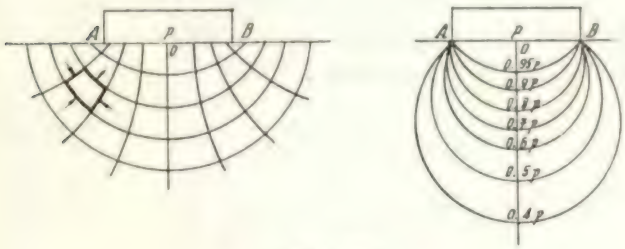


Fig. 30

(Arangoá [75] pág. 211)

turas, que por vezes são tais que o volume de vazios é superior ao ocupado pelas partículas.

A fig. 31 dá ideia dessas diferentes estruturas (segundo Terzaghi):

a) corresponde à estrutura unigranular, em solo compacto;
b) à mesma, em solo móvel;
c) à estrutura alveolar;
d) à estrutura grumosa.

Mas o problema de compressibilidade complica-se ainda notàvelmente no caso das argilas pela presença da água. Como se sabe, a expulsão da água contida nos canalículos intersticiais só se dá lentamente — daí que o processo de consolidação dum solo carregado se possa arrastar durante anos.

Estamos agora perante o problema fundamental do assentamento do terreno sob as cargas. Foi ainda Terzaghi quem mostrou a possibilidade de dividir o assentamento total em duas componentes. A 1.ª corresponde à compressão do solo sob as cargas. A 2.ª diz respeito à deformação lateral do terreno. Desde que o valor da carga aplicada não exceda os limites vulgares, a deformação respectiva é pequena. Pelo contrário a primeira componente tem uma grande importância.

Na fig. 32 Δ_1 representa o assentamento de deformação; Δ_2 o assentamento de consolidação.

28 — Estudo experimental

Uma vez que, como vimos, as cargas aplicadas são suficientemente pequenas para deduzirmos que não há deformação lateral sensível, lógico é pensar, como fez Terzaghi, em tomar um cilindro de solo rìgidamente isolado, aplicando-lhe cargas variáveis, e determinando a sua compressibilidade.

Deveria contudo desde o início ter-se em atenção que em cilindros de grande altura, o efeito de silo pode mascarar o fenómeno em estudo. Daí o emprego de cilindros de pequena altura relativamente ao diâmetro — mas, contudo suficiente para que as dimensões das partículas do solo sejam pequenas em relação a ela. Isso acarreta a necessidade de medidas de precisão, pois as deformações hão de forçosamente ser muito pequenas.

É este o princípio do edómetro, concebido por Terzaghi e que tão altos serviços tem prestado em Mecânica do Solo.

Certamente as indicações assim obtidas não atingem a precisão das colhidas num ensaio de compressão tri-axial, em que se podem variar à vontade as tensões principais em sentidos normais. Mas ao passo que no edómetro um ciclo completo de carga e

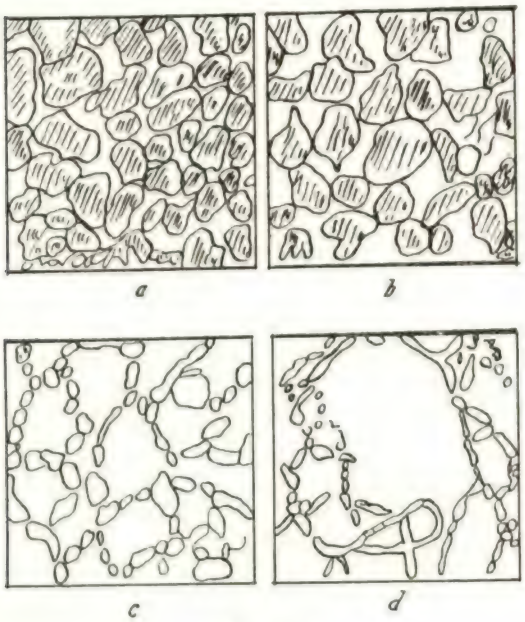


Fig. 31

descarga leva cerca de 15 dias, o ensaio de compressão com duas tensões variáveis gasta muitos meses de trabalho.

Determinada a compressibilidade no edómetro, o princípio de cálculo dos assenta-

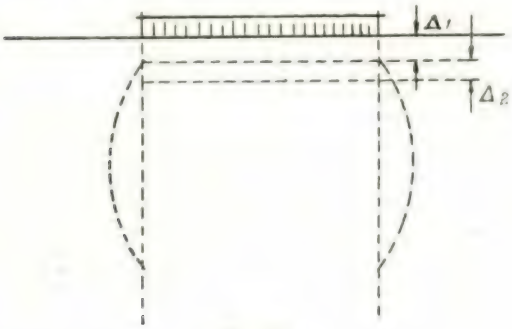


Fig. 32

mentos baseia-se, como veremos em supor que estes resultam da expulsão da água contida no solo, sob a acção de cargas verticais.

No aparelho, assimila-se a componente normal vertical das tensões num ponto dado do solo a uma tensão principal, sendo igualmente as tensões horizontais supostas principais.

Quando a água tem possibilidade de se escapar o grau de humidade da argila limitada lateralmente e inicialmente saturada, varia em razão inversa das cargas aplicadas.

Na prática, o que determinamos é a relação entre o índice de vazios e a pressão aplicada; para que uma variação da pressão capilar (devida à evaporação) se não produza, é necessário manter sob água a amostra em estudo. Suponhamos que conhecemos a curva de variação do índice de vazios com a pressão, estando impedida a evaporação. Isso corresponde a conhecer também a variação da pressão capilar com a evaporação. Mas devemos ter o cuidado de eliminar qualquer gradiante hidráulico, que iria produzir uma pressão a somar geomètricamente com a que aplicamos.

No capítulo seguinte, ao descrevermos o aparelho, acentuaremos a forma como se asseguram estas condições.

Tomando em abcissas as pressões e em ordenadas os índices de vazios, obtém-se curvas logarítmicas. Podem empregar-se para as pressões a escala logarítmica, tomando uma razão constante (por exemplo 2) entre as cargas aplicadas.

A fig. 33 mostra justamente um diagrama dum ensaio edométrico, com os ciclos da compressão e expansão.

29 — Curva edométrica

Terzaghi, citado em Buisson [41], estabeleceu para expressão da curva de expansão no edómetro a seguinte:

$$e = -\frac{1}{A}\log(p + p_i) + C \quad . \; . \; . \; . \quad (32)$$

em que

e = índice de vazios
p = pressão exercida
A, p_i e C = constantes

Se fizermos tender p para zero, vê-se que a expansão não se produz indefinidamente, pela presença da constante p_i (pressão inicial).

Esta curva vale apenas para p inferior à carga máxima atingida.

Podemos pôr (32) sob a forma

$$e = -\frac{1}{A}\log\left(\frac{p}{p_i}+1\right)+e_o \quad . \; . \; . \quad (33)$$

sendo e_o o valor de e para $p = 0$ (supondo $p_i > 1$):

$$e_o = -\frac{1}{A}\log p_i + C$$

Se agora for $p + p_i = 1$

$$e_1 = C$$

que nos dá o significado da constante C.

Nas mesmas condições, como

$$\frac{de}{dp} = -\frac{1}{A}\,\frac{1}{p+p_i}$$

e sendo $p + p_i = 1$

$$\frac{de}{dp_{(1)}} = -\frac{1}{A} = a$$

Obtivemos assim o significado da constante A — contangente do ângulo de inclinação da curva sobre o eixo das pressões num ponto em que $e = C$. Na representação logarítmica, $-\frac{1}{A}$ é o coef. angular da recta $e = F\,[\log(p+p_i)]$.

A constante a caracteriza a expansão no solo em estudo. No caso de compressão representa o *coeficiente de compressibilidade*.

Como

$$\frac{dh}{h} = \frac{de}{1+e} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (34)$$

(h é a altura da amostra)

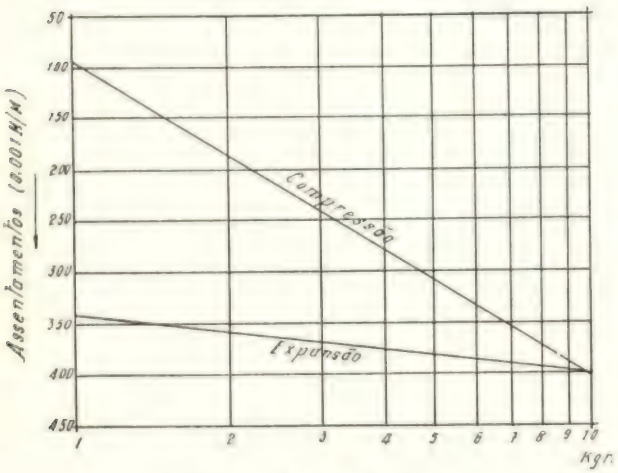


Fig. 33

(De Beer [41])

resulta

$$\frac{dp}{E} = -\frac{dh}{h}$$

$$E = -\frac{h\,dp}{dh} = -(1+e)\frac{dp}{de} =$$

$$= (1+e)\,A\,(p+p_i) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (35)$$

ou ainda

$$E = A\,(p+p_i)$$

$$\left[1+e_o-\frac{1}{A}\log\left(1+\frac{p}{p_i}\right)\right] \quad . \; . \; . \quad (36)$$

Se entre os limites das pressões aplicadas e varia pouco, podemos tomar o seu valor médio e_m, donde

$$E = A\,(p+p_i)\,(1+e_m) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (36\text{-A})$$

desde que

$$\log\left(1+\frac{p}{p_i}\right)$$

se mantenha aproximadamente constante e pequeno relativamente à unidade. Como A varia de 20 a 100,

$$\frac{1}{A}\log\left(1+\frac{p}{p_i}\right)$$

pode desprezar-se em face de $(1 + e_o)$, se p não for elevado. Concluímos que nessas condições o *módulo de elasticidade varia proporcionalmente à pressão*. Adiante veremos outras leis possíveis dessa variação.

Estudada a curva de expansão, resta analizar a curva de compressão. Terzaghi atribui-lhe a equação

$$e = -\alpha\log(p+p_c) - \beta\,(p+p_c) + C \quad (37)$$

em que α, β e C são números positivos sensìvelmente constantes em todos os solos; p_c é positivo, dependendo do solo e do valor de e no começo da carga, variando no sentido inverso deste último valor. Como e depende do grau de humidade, vê-se que este condiciona a posição da curva relativamente ao eixo dos e.

Como β é pequeno, pode-se tomar valor da compressibilidade (em primeira aproximação) o valor de α.

O termo $\beta\,(p + p_c)$ traduz as transformações irreversíveis que tem lugar durante a compressão.

As curvas no caso das areias diferem apenas pelo valor dos coeficientes. Assim para uma areia pode ser

$$e = -\frac{1}{100} \log (p + 1{,}5) + C$$

e para uma argila

$$e = -\frac{1}{50} \log (p + 1{,}5 \times 10^{-3}) + C$$

Mesmo para pressões elevadas, as areias conservam a sua estrutura, ao contrário das argilas. A equação (37) tem, para pressões elevadas um termo complementar em p.

30 — Cálculo dos assentamentos

Estamos agora em condições de compreender o fundamento do cálculo dos assentamentos para o que seguiremos a exposição de Kahn [39].

Para isso suponhamos um prisma de solo de secção 1×1 e comprimento L (fig. 34). Se supusermos as partículas sólidas compactamente unidas, a altura ocupada será c, enquanto v representará a soma de todos os vazios

Façamos actuar sobre o prisma uma certa pressão. Como, segundo Terzaghi, a elasticidade do solo corresponde a um novo arranjo da sua estrutura e não à compressibilidade das suas partículas, o valor c não muda, estando impedida a dilatação lateral; mas o de v será reduzido.

Tem-se

$$L = c + v \quad \ldots\ldots \quad (38)$$

Pela definição de índice de vazios

$$e = \frac{v}{c} \text{ ou } v = c \,.\, e$$

donde

$$L = c + c \,.\, e = c\,(1 + e)$$

$$c = \frac{L}{1 + e} \quad \ldots\ldots \quad (39)$$

Diferenciando (38), atendendo a que c é constante

$$\Delta L = \Delta v = c\,\Delta e = \frac{L}{1 + e}\,\Delta e$$

ou

$$\Delta L = \frac{\Delta e}{1 + e} \,.\, L \quad \ldots\ldots \quad (40)$$

Portanto: se conhecermos a altura duma camada de solo, o seu índice de vazios *inicial* e, e a variação desse índice sob a carga, poderemos calcular o assentamento correspondente.

Como a pressão varia com a profundidade (quer pela forma de transmissão, quer pelo peso próprio das camadas sobrejacentes) divide-se pràticamente a altura da camada

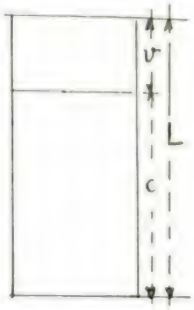


Fig. 34

em estudo em parcelas mais pequenas, para as quais se calculam os assentamentos elementares, que depois se adicionam.

Chamando *assentamento específico* às quantidades

$$\frac{\Delta e}{1 + e} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (41)$$

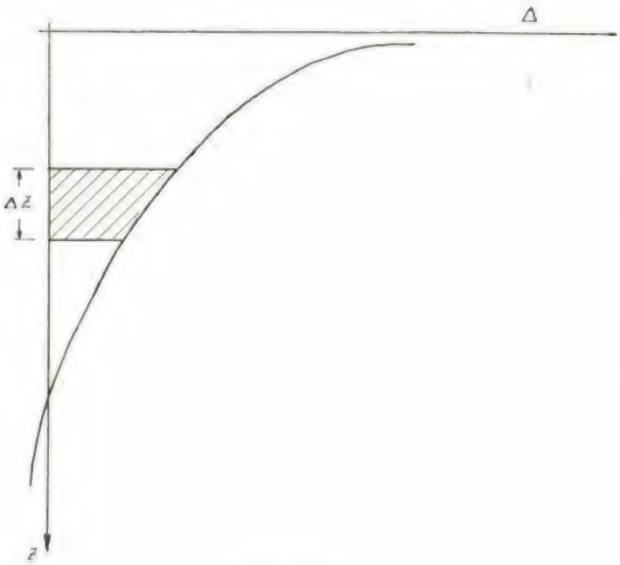


Fig. 35

(Kahn [39] pág. 341)

podemos proceder por simples integração gráfica, tomando em ordenadas as alturas

das camadas elementares e em abcissas os valores das grandezas [41]. Para cada altura, a superfície limitada pela curva e pelo eixo das ordenadas dá o valor do assentamento correspondente (fig. 35).

Uma solução aproximada analítica é indicada por Kahn.

Partindo da equação edométrica

$$e = -\frac{1}{A}\log(P_i + p) + C$$

e fazendo

$$p + p_i = \sigma_q$$

e

$$e = e_q$$

sendo

$$e_q = -\frac{1}{A}\log\sigma_q + C;$$

e semelhantemente para

$$p + p_i = \sigma_g$$

$$e = e_g$$

$$e_g = -\frac{1}{A}\log\sigma_g + C$$

resulta

$$e_g - e_q = \Delta e = +\frac{1}{A}\log\frac{\sigma_q}{\sigma_g} =$$

$$= +\frac{1}{A}\log\left(1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_g}\right) \quad . \; . \; . \; (42)$$

pois

$$\sigma_q = \sigma_g + \sigma_p$$

$\frac{\sigma_p}{\sigma_g}$ é o cociente entre a pressão adicional resultante da sobrecarga (σ_p) e a pressão devida ao peso próprio do solo (σ_g).

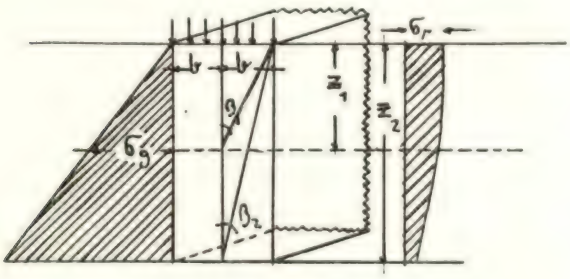


Fig. 36

(Kahn [39] pág. 341)

Atendendo à equação (40) a soma dos assentamentos para uma altura $z_2 - z_1 = \Delta z$ será (fig. 36)

$$\Sigma\Delta z = \int_{z_1}^{z_2}\frac{e}{1+e}\,dz = \frac{1}{1+e}\int_{z_1}^{z_2} e.\,dz. \quad . \; . \; . \; (43)$$

pois e representa o índice de vazios inicial; além disso Δe obedece a (42): logo

$$\Sigma\Delta z = \frac{1}{A(1+e)}\int_{z_1}^{z_2}\log\left(1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_g}\right)dz \quad . \; . \; (44)$$

Em casos particulares e sendo σ_p e σ_g expressos em função de z é possível ter uma solução analítica, desde que o factor de ensaio edométrico forneça o valor de expansão A.

Um outro método de cálculo de assentamentos, devido a Kahn [39] baseia-se no facto conhecido de a influência duma sobrecarga superficial diminuir ràpidamente com a profundidade, ao passo que a pressão devida ao peso próprio cresce linearmente com a profundidade. Assim, para assentamentos de camadas a profundidade apreciável (fundações de estacas ou poços, por exemplo) a pressão vertical σ_p devido à sobrecarga será sempre notàvelmente inferior à pressão σ_g devida ao peso próprio.

Se

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_g} \leq 0{,}5$$

na equação (44) pode com aproximação fazer-se a substituição:

$$\log\left(1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_g}\right) = \frac{\sigma_p}{\sigma_g} \quad . \; . \; . \; . \; (45)$$

com um erro máximo de 23 % no sentido mais desfavorável (valor por excesso). Resulta:

$$\Sigma\Delta Z = \frac{1}{A(1+e)}\int_{z_0}^{z_1}\left(\frac{P}{g}\right)dz \quad (46)$$

Exprimamos as expressões em função de z.

Sendo δ a densidade aparente do solo, tem-se:

$$\sigma_g = \delta \,.\, z \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; (47)$$

O caso de σ_p é mais complicado. É necesário recorrer às fórmulas da teoria da elasticidade que dão para os diferentes casos a repartição das pressões com a profundidade.

Assim, suponhamos uma sobrecarga uniformemente repartida ao longo duma faixa estreita, de largura $2\,b$ (fig. 36). Tem-se segundo Fröhlich:

$$\sigma_p = \frac{2\,p}{\pi}\,(\beta + \operatorname{sen}\beta\cos\beta) \quad . \; . \; . \quad (48)$$

em que β obedece a

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{b}{z}$$

donde

$$\beta = \operatorname{arc\,tg}\frac{b}{z}$$

$$\operatorname{sen}\beta\cos\beta = \frac{b\,z}{b^2 + z^2}$$

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_g} = \frac{2\,p}{\pi\,\delta}\left[\frac{1}{z}\operatorname{arc\,tg}\frac{b}{z} + \frac{b}{b^2 + z^2}\right] \quad (49)$$

e substituindo em (46)

$$\Sigma\,\Delta\,Z = \frac{2\,p}{A\,(1+e)\,\pi\,\delta}\int_{z_1}^{z_2}\left[\left(\frac{1}{z}\right)\operatorname{arc\,tg}\frac{b}{z} + \right.$$

$$\left. + \frac{b}{(b^2 + z^2)}\right]\,d\,z \quad . \; . \; . \; . \quad (50)$$

desenvolvendo arc tg z em série, a integração é fácil, donde

$$\Sigma\,\Delta\,Z = \frac{2\,p}{A\,(1+e)\,\pi\,\delta}\,[(\operatorname{arc}\beta_1 - \operatorname{arc}\beta_2) +$$

$$+ (\operatorname{tg}\beta_1 - \operatorname{tg}\beta_2) - 0{,}111\,(\operatorname{tg}^3\beta_1 - \operatorname{tg}^3\beta_2) +$$

$$+ 0{,}040 \times (\operatorname{tg}^5\beta_1 - \operatorname{tg}^5\beta_2)]$$

São desprezáveis os termos de grau superior a 5.

Suponhamos agora que a sobrecarga é constituída por uma fundação isolada de forma quadrada ou circular.

$$\sigma_p = \frac{3\,P}{2\,\pi\,Z^2}\,(\text{Boussinesq e Fröhlich})$$

$$\sigma_g = \delta\,.\,Z$$

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_g} = \frac{3\,P}{2\,\pi\,Z^3} = \frac{k}{Z^3}$$

em que $k = \dfrac{3\,P}{2\,\pi\,\delta}$

$$\Sigma\,\Delta\,Z = \frac{1}{A\,(1+e)}\int_{Z_1}^{Z_2}\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_g}\right)d\,Z =$$

$$= \frac{k}{A\,(1+e)}\int_{Z_1}^{Z_2}\frac{d\,Z}{Z^3} = +\frac{k}{2\,A\,(1+e)} \times$$

$$\times\left(\frac{1}{Z_1^2} - \frac{1}{Z_2^2}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (51)$$

em que

$$Z_1 = \frac{b}{\operatorname{tg}\beta_1}$$

$$Z_2 = \frac{b}{\operatorname{tg}\beta_2}$$

ou

$$\Sigma\,\Delta\,Z = \frac{k}{2\,A\,(1+e)}\cdot\frac{1}{b^2}\,(\operatorname{tg}^2\beta_1 - \operatorname{tg}^2\beta_2)$$

Fazendo ainda

$$p = \frac{P}{4\,b^2}$$

resulta

$$\Sigma\,\Delta\,Z = \frac{3\,p}{\pi\,\delta\,A\,(1-e)}\,(\operatorname{tg}^2\beta_1 - \operatorname{tg}^2\beta_2) \quad . \; . \quad (52)$$

31 — A lei de Hooke na estabilidade dos solos

É fácil ver que os solos coerentes ou incoerentes não obedecem à lei de Hooke se não estiverem submetidos a pressões capilares. Pelo contrário, os solos coerentes de elevada pressão capilar obedecem sensìvelmente a esta lei e, por consequência é-lhes aplicável o estado de tensões de Boussinesq.

Vejamos o primeiro caso.

Seja à profundidade z

$$p = \delta\,.\,z$$

Os resultados do cálculo de E, pelas fórmulas (35) ou (36) são sensìvelmente idênticas desde que z não seja muito elevado. Pode-se pôr então

$$E = B\,(\delta\,.\,z + p_i)$$

e se a pressão capilar é fraca

$$E = B\,\delta\,.\,z = k\,z$$

e o módulo de elasticidade varia com a profundidade.

A mesma lei de variação de E se obtém quando

$$p = p' + \delta \cdot z$$

sendo p' = pressão provocada pela sobrecarga, desprezável se a profundidade for suficiente.

Mas se p_i = pressão inicial do solo for elevada (caso dos solos coerentes de alta pressão capilar) já E se mantém, como tínhamos anunciado sensìvelmente constante.

31 — Exemplo do cálculo de assentamentos (Buissom [41])

Tirou-se uma amostra dum solo, que no terreno suportava uma pressão de cerca de 1.800 gr. Quere-se determinar o assentamento provável duma camada de 1 m de espessura ϕ, e 12 m de profundidade a que pertencia essa amostra, sobre a qual existe um edifício de grande comprimento, com 12 m de largura, e carregando o solo a 1 kgr/cm², na prumada do eixo da construção. Por cima desta camada existe uma toalha de água de fraca espessura, e por baixo um estrado de areia e cascalho pràticamente incompressível. A camada argilosa apresentou no ensaio um índice de vazios inicial de 80 °/₀.

A 12 m tem-se para pressão devida à carga 550 gr.

A variação do índice de vazios para uma variação de carga de 1.800 gr a 2.350 gr è de 0,805 para 0,788.

Tem-se

$$\Delta e = 0{,}017$$

$$\Delta z = \frac{\Delta e}{1 + e} L = \frac{0{,}017}{1 + 0{,}8} \times 100 = 0{,}95 \text{ cm}$$

33 — O processo da consolidação

Uma das características mais notáveis dos fenómenos de consolidação é a intervenção do factor tempo. Camadas de argilas impermeáveis podem estar em processo de consolidação durante muitos anos, embora o estado das solicitações exteriores se mantenha sem mudanças.

Já vimos qne qualquer material poroso tende a reduzir o volume dos seus vazios, quando carregado, e estabelecemos também a equação que liga a variação do índice de vazios com a variação da pressão

No caso das argilas, os poros estão geralmente cheios de água, e a aplicação das cargas provoca um aumento de pressão hidrostática pelo facto de a expulsão do excesso não se poder fazer instantâneamente em virtude da pequena permeabilidade.

Terzaghi ilustra o mecanismo do fenómeno com um aparelho mecânico muito simples, mostrado na fig. 37. É constituído por um cilindro dentro do qual existe uma série de pequenos êmbolos perfurados, ligados por molas helicoidais de igual rigidez. O cilindro está cheio de água, e sobre os êmbolos actua uma carga p por unidade de superfície. Apliquemos um acréscimo dp a essa carga. O tubo piezométrico acusa um aumento de pressão na água, que vai dimi-

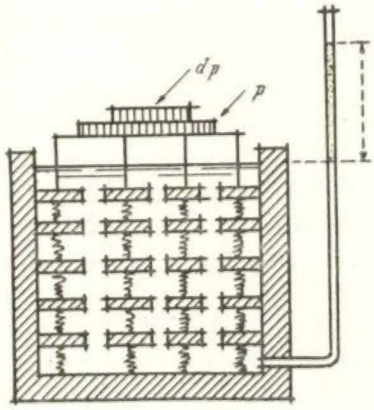


Fig. 37

nuindo com o tempo até retomar o valor inicial. Compreende-se a razão de tal facto. A carga aplicada primeiro aos êmbolos da camada superior, não é transmitida instantâneamente às molas e aos êmbolos das diversas camadas, pois a água que ocupa os espaços livres não pode escoar-se sem decorrer um certo tempo. Daí que seja a água a tomar inicialmente esse acréscimo de pressão. À medida que o escoamento da

água se vai fazendo, a pressão vai sendo gradualmente transferida para as molas, e o nível desce no tubo piezométrico.

Uma camada de argila no terreno, sujeita a cargas, sofre um processo idêntico. A equação que traduz o fenómeno aparece na Hidráulica sob a forma duma equação às derivadas parciais de 2.ª ordem

$$C\,\Delta^2 u = \frac{\partial u}{\partial t} \quad . \; . \; . \; . \; . \; (53)$$

que tem a estrutura duma equação de continuidade. Nela u representa o *excesso hidrostático* no tempo t e C uma constante denominada *coeficiente de consolidação,* dependente do índice de vazios, permeabilidade e da inclinação média da curva de compressão sob o aumento de carga considerado.

É

$$C = \frac{k\,(1 + e)}{a}$$

sendo k o coeficiente de permeabilidade.

O *excesso hidrostático* é representado pela pressão da água num determinado ponto e instante. A consolidação termina quando este excesso é completamente anulado.

A fig. 38 mostra para o ensaio duma amostra as curvas de variação do índice de vazios com a pressão, e a curva de consolidação.

O aparelho é um consolidómetro, adaptação grosseira do edómetro de Terzaghi.

A fig. 38 mostra o caso dum estracto argiloso contido entre duas camadas permeáveis. A pressão inicial é p_o e a resultante do aumento de carga é p_1.

As condições de consolidação são aproximadamente idênticas às do ensaio referido.

A integração da equação (53), que não é fácil, foi conseguida para vários casos de consolidação unidimensional. Se o excesso didráulico inicial u, puder ser expresso em função da profundidade — ou seja $u = f(z)$ — obtém-se o excesso hidrostático num certo ponto e instante pela expressão (Jennings [48])

$$u = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left[\frac{1}{b} \int_0^{2h} f(z) \operatorname{sen} \frac{n \pi z}{2b} \, dz \right] . \left[\operatorname{sen} \frac{n \pi z}{2b} \right] e^{\frac{-n^2 \pi^2 C t}{4 h^2}} \quad . \; . \; . \; (54)$$

sendo z medido a partir da parte superior da amostra (ou estrato), $2\,h$ a espessura da camada, G a constante da equação (53) e u qualquer inteiro desde 1 até infinito.

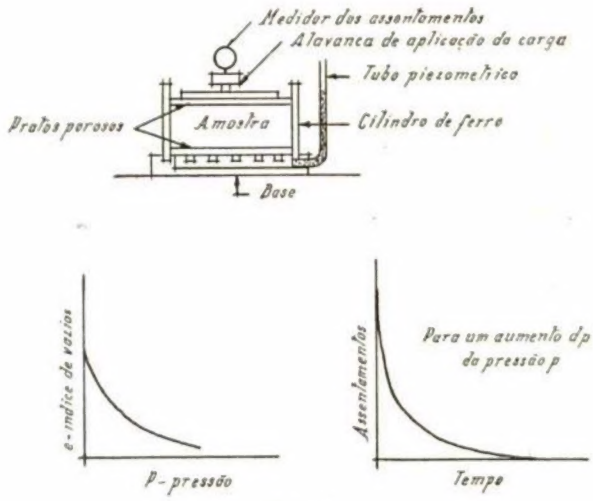


Fig 38

Jennings [48] pág. 154

Se o excesso hidrostático for constante — $u_o = f(z)$ — a expressão (54) simplifica-se:

$$\frac{u}{u_o} = \sum_{m=o}^{m=\infty} \frac{4}{(2m+1)\pi} \left[\operatorname{sen} \frac{2m+1}{2} \, n \frac{z}{h} \right] e^{\frac{-(2m+1)^2 \pi^2 T}{4}} \quad . \; . \; . \; (55)$$

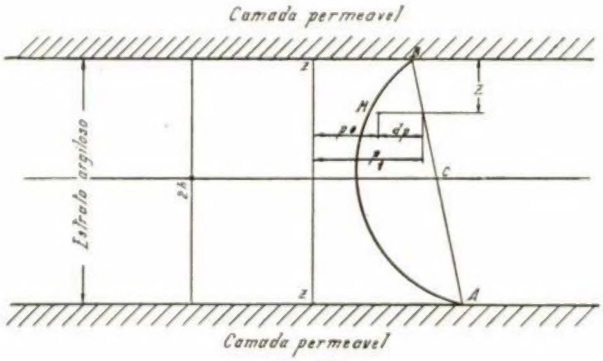


Fig. 39

Jennings [48] pág. 154

em que $2\,h$ é altura inicial da camada *drenada superior e inferiormente.*

$$T = \frac{Ct}{h^2} = \frac{k\,t\,(1 + e)}{a \,.\, h^2} \quad . \; . \; . \; (56)$$

é o *factor tempo* (sem dimensões), e $\frac{u}{u_o}$

representa o cociente do excesso hidrostático num determinado ponto e instante pela pressão inicial no mesmo ponto — ou ainda a diferença para 100 da percentagem de consolidação no ponto considerado e no instante t. Se a drenagem se fizesse apenas

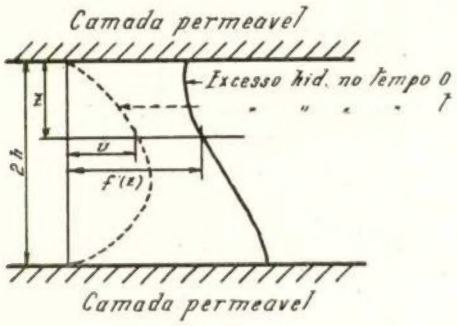


Fig. 40

(Jennings [48] pág. 154)

por uma das faces, notaríamos a altura com h.

A fig. 40 ilustra o processo de consolidação. A fig. 41 mostra curvas de $\frac{u}{u_0}$ para secções verticais ao longo do estrato, obtidas atribuindo valores numéricos a $\frac{z}{h}$

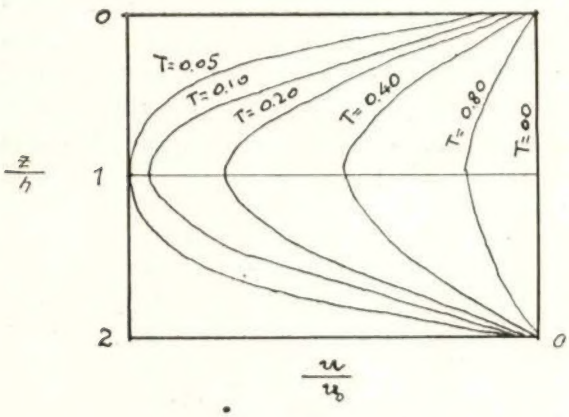


Fig. 41

Jennings [48] pág. 191)

Mostram claramente que junto das superfícies drenadas o solo é mais compacto do que no centro, como de resto se verifica muitas vezes nas condições naturais.

Chamamos *grau de consolidação U* à razão do assentamento ao fim do tempo t para o assentamento total multiplicado por 100.

A sua expressão mais geral será

$$U\,\% = 100\,f(T) = f\left(\frac{C\,t}{h^2}\right) \times 100 \quad . \; . \; . \quad (57)$$

A fig. 42 representa uma curva de consolidação teórica.

Conhecendo c dos ensaios de laboratório podemos predizer o assentamento final. A fig. 43 mostra as curvas de assentamento teóricas no caso dum edifício, assente sobre uma camada de argila branda intercalada entre os estratos permeáveis. Vê-se que o assentamento diferencial entre os pontos A a B é importante.

Antes de fazermos referência a alguns casos notáveis ligados a estes fenómenos,

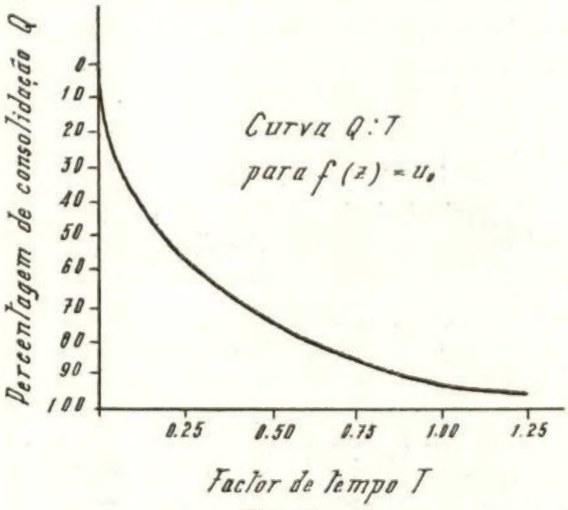


Fig. 42

(Jennings [48] pág. 191)

recordemos que as hipóteses admitidas na análise feita são as seguintes:

a) solo homogéneo e isotropo

b) vazios inteiramente preenchidos com água

c) esforços nas partículas e águas desprezáveis;

d) percolação laminar e seguindo a lei de Darcy.

Junto do extremo oriental da ponte de S. Francisco — Oakland Bay (1) construíu-se

(1) Exemplo citado por Terzaghi [58].

um poço de observação com o fim de pôr em evidência a existência duma pressão hidrostática mais elevada nas camadas inferiores dum estrato argiloso em via de consolidação. Neste caso, trata-se duma argila branda cuja consolidação é provocada por um aterro, e o fundo do poço está cerca de 3 metros abaixo da base desse aterro. A água subiu no poço muito acima da crista do aterro, ficando a um nível superior ao da base.

Um outro caso, citado por Terzaghi [1] é o duma central de vapor, cujo alçado se representa na fig. 44, assente numa camada de argila branda que por sua vez repousa em areia e cascalho, mas isolada por uma camada de xisto.

Para obter água para a casa das máquinas, foi aberto um poço também representado na figura, até à camada de areia e cascalho onde existia água em abundância.

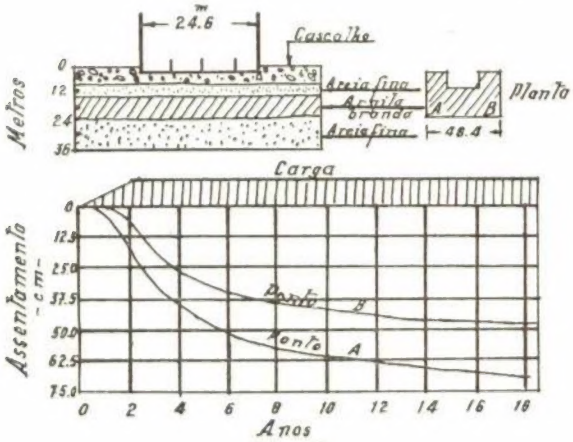


Fig. 43

(Jennings [48] pág. 191)

Mas verificou-se um assentamento notável do edifício, assentamento que ao fim de poucas semanas atingia no cunhal junto do poço, cerca de 30 centímetros. Esse assentamento catastrófico só cessou quando o poço foi entulhado.

A mecânica do processo de consolidação da argila por bombagem da água contida nas camadas arenosas subjacentes pode pôr-se em evidência pela experiência seguinte, também devida a Terzaghi [58].

Coloca-se num vaso cilíndrico uma camada de argila branda sobre uma outra de areia. Estando a torneira *A* (fig. 45) fechada mantém-se água no cilindro ao nível *D*. A consolidação da argila sob o seu próprio peso acaba por terminar (o que se traduz pelo facto de a sua superfície deixar de aluir; abre-se então a torneira, reduzindo a

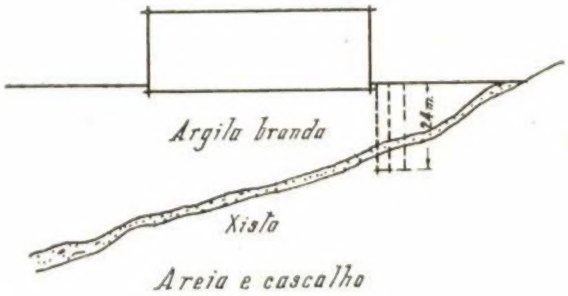


Fig. 44

pressão de água existente sobre a camada de areia de *h* a zero; o nível de água é mantido inalterado no cilindro. Portanto não se alterou a pressão normal total numa secção horizontal de argila; o que se modifica, pelo facto de se permitir a drenagem através da areia é a pressão da água contida na argila, e a diminuição desta grandeza provoca, como sabemos, o decréscimo do índice de vazios e consequente abertura dum novo ciclo de consolidação. De facto, logo que se abriu a torneira, a camada argilosa recomeçou a assentar, e o novo estado de equilíbrio só veio a ser atingido algumas semanas mais tarde.

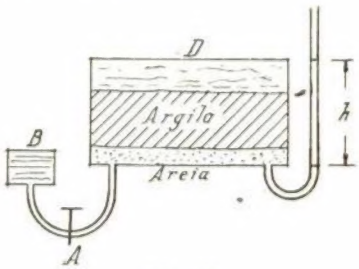


Fig. 45

(Terzaghi [48])

Um notável exemplo [1] da realização em grande escala das condições da experiência é oferecido pela exploração, de alguns anos para cá, das toalhas de água localizadas em

[1] Citado em Terzaghi [59].